IL PROBLEMA PRE-CLOVIS

Siti, Cronologie e Paradigmi del Popolamento Pre-Clovisiano delle Americhe

Silvano Salvador

Monografia critica interdisciplinare

INTRODUZIONE GENERALE

Il problema e la sua struttura epistemica

Ci sono dati che la scienza non confuta: li archivia. Non perché siano privi di contenuto empirico, ma perché la loro accettazione implicherebbe costi revisionistici troppo alti per i paradigmi dominanti. La questione del popolamento pre-Clovis delle Americhe appartiene a questa categoria difficile — e il suo caso è, per certi versi, ancora più istruttivo di molte controversie analoghe nella storia della scienza, perché qui la comunità scientifica ha effettivamente operato una revisione paradigmatica, sia pure con la lentezza e la riluttanza che si osserva in tutti i campi dove l'evidenza sfida strutture interpretative consolidate da decenni di investimento intellettuale e istituzionale.

Questo processo — la resistenza, la crisi, la revisione parziale, il consolidamento incompleto — è, da solo, un oggetto di studio che merita la stessa attenzione che si riserva ai dati empirici sottostanti. Una monografia che non li tenesse contemporaneamente a fuoco mancherebbe qualcosa di essenziale sulla natura della conoscenza che produce.

Il paradigma "Clovis First" — l'idea che i primi esseri umani a popolare le Americhe fossero i produttori della cultura Clovis, i cui manufatti diagnostici (le punte bifacciali con scanalatura basale, le lame prismatiche, gli strumenti ossei) sono datati a ca. 13.500–12.800 anni prima del presente nel calibrato BP usando le calibrazioni IntCal20 — dominò il pensiero americanista dalla sua sistematizzazione negli anni Sessanta fino alla sua prima vera crisi a metà degli anni Novanta. La crisi fu precipitata non da un'accelerazione improvvisa delle scoperte, ma dall'accumulazione di evidenze che non riuscivano più a essere ignorate, e soprattutto dal riconoscimento formale del sito di Monte Verde da parte di un panel di esperti nel 1997 — un evento che ha pochi precedenti nella storia della revisione paradigmatica in archeologia per la sua chiarezza procedurale.

Ma la revisione fu parziale. Ciò che la comunità accettò nel 1997 fu che gli esseri umani erano in America del Sud almeno 14.600 anni fa (la data di MV-II, la componente principale del sito di Monte Verde). Ciò che rimase aperto — e che questa monografia si propone di analizzare in tutta la sua complessità — è la questione di quanto più antiche potessero essere le prime presenze umane nelle Americhe, e con quale evidenza. I siti che rivendicano date nell'intervallo 20.000–50.000 anni prima del presente — da Pedra Furada in Brasile (Guidon, ~48.000 BP) a Chiquihuite in Messico (Ardelean et al. 2020, ~26.000 BP), da Bluefish Caves in Canada (Bourgeon et al. 2017, ~24.000 BP) a Huaca Prieta in Perù (Dillehay et al. 2017, ~14.500 BP per livelli

occupazionali ma con evidenze di frequentazione risalenti al ~32.000 BP secondo alcuni autori), a Cerutti Mastodon in California (Deméré et al. 2017, ~130.000 BP) — formano un corpus di evidenze contestate la cui valutazione non può essere fatta in modo impressionistico, citando i siti più spettacolari o quelli più vicini alla sensibilità del commentatore, ma richiede un'analisi sistematica caso per caso e una riflessione metodologica sulla struttura dei criteri di accettazione.

L'obiettivo di questa monografia è triplice. Il primo è fornire un'analisi critica sistematica dei principali siti pre-Clovis rivendicati, valutandone la qualità stratigrafica, la robustezza delle date radiocarboniche, la natura dei manufatti o delle evidenze biologiche invocate, e il grado di consenso che ciascun sito ha ricevuto nella letteratura specialistica. Il secondo è analizzare la struttura epistemica del dibattito — come si definisce l'onere della prova, cosa costituisce evidenza accettabile, e come la comunità ha risposto alle evidenze pre-Clovis nel corso dei decenni — con gli strumenti della filosofia della scienza e della sociologia della conoscenza scientifica.

Il terzo è quantificare, nella misura in cui i dati disponibili lo consentono, le implicazioni demografiche, genetiche e paleoecologiche dei diversi scenari cronologici: cosa implicherebbe, per la struttura del popolamento, per la demografia dei primi americani, e per la comprensione dell'estinzione della megafauna, che gli esseri umani fossero in America 15.000, 20.000, 30.000 o 130.000 anni fa?

I.1 Una mappa epistemologica strutturata del problema

Prima di entrare nel merito tecnico, è necessario costruire una mappa epistemologica del problema che ci si accinge ad affrontare, in modo analogo a quanto si farebbe con qualsiasi sistema complesso: identificare i livelli, le dipendenze logiche tra i livelli, e le fonti di errore specifiche di ciascuno. Il dibattito sul pre-Clovis non è un dibattito unitario; è composto da almeno cinque strati argomentativi distinti che devono essere tenuti rigorosamente separati per evitare le confusioni argomentative — sia dei propositori che dei critici — che hanno caratterizzato decenni di discussione improduttiva.

Strato 1 — Fattibilità fisica delle rotte di accesso: Il subcontinente americano era raggiungibile da esseri umani nelle finestre temporali rivendicate dai siti contestati? Questo è un problema empirico ben definito, affrontabile attraverso la paleoclimatologia, la glaciologia quaternaria, la modellazione oceanografica e la paleogeografia. La risposta varia a seconda della finestra temporale: la Beringia era accessibile come ponte terrestre durante periodi di basso livello del mare (più di 120 m al di sotto del livello attuale nelle fasi di massimo glaciale), il corridoio ice-free era aperto in certi periodi e chiuso in altri, la rotta costiera del Pacifico era accessibile su

imbarcazioni o su ghiaccio marino con una tecnologia plausibile per il Paleolitico superiore.

Questo strato fornisce i vincoli entro cui tutti gli altri strati devono essere valutati: nessuno scenario cronologico è accettabile se richiede una rotta di accesso fisicamente impossibile.

Strato 2 — Qualità stratigrafica dei siti: I manufatti o le tracce biologiche rivendicati come pre-Clovis si trovano in contesti deposizionali integri, con associazione stratigrafica documentabile tra le tracce antropiche e i materiali datati? Questo è il problema tecnico più immediato e più frequentemente discusso nella letteratura. La sua risoluzione richiede l'analisi micromorfologica dei sedimenti, la ricostruzione tridimensionale della distribuzione degli oggetti, e la valutazione dei processi post-deposizionali (bioturbazione, crioturbazione, soliflusso, rimescolamento alluvionale) che potrebbero aver alterato l'associazione originale. Nei capitoli analitici che seguono, questo strato riceve l'attenzione tecnica che merita per ciascun sito.

Strato 3 — Robustezza delle datazioni: Le date attribuite ai contesti pre-Clovis sono cronometricamente affidabili nel senso pieno del termine — cioè producte con protocolli adeguati, su materiali appropriati, con sufficiente replicazione, e corroborate da metodi indipendenti? Questo strato è analizzato in modo sistematico nel Capitolo I, che fornisce la base tecnica per tutte le valutazioni successive.

Strato 4 — Natura antropogenica delle evidenze: Gli oggetti o le tracce biologiche invocati come indicatori di presenza umana sono effettivamente di origine antropica, distinguibili con sufficiente certezza da geofatti, tafonomi, o altri prodotti di processi naturali? Questo strato è spesso il più delicato, perché la distinguibilità di manufatti da geofatti è una questione di soglia probabilistica — non di certezza assoluta — e la soglia accettabile non è mai stata esplicitata a priori dalla comunità.

Strato 5 — Coerenza paleoecologica e demografica: Gli scenari cronologici che le evidenze suggeriscono sono coerenti con la struttura dell'ecosistema preistorico americano, con i modelli demografici della colonizzazione, con il record genetico delle popolazioni native, e con la dinamica dell'estinzione della megafauna? Questo strato è analizzato nei Capitoli III e IV, e fornisce vincoli di plausibilità indipendenti rispetto ai dati archaologici.

La struttura a cinque strati ha una conseguenza metodologica che non può essere sottolineata abbastanza: le risposte ai cinque strati sono parzialmente indipendenti.

Una risposta negativa allo Strato 4 (evidenze non antropiche) non implica una risposta negativa allo Strato 1 (impossibilità delle rotte). Una risposta affermativa allo Strato 5 (plausibilità paleoecologica) non implica una risposta affermativa allo Strato 2 (integrità stratigrafica). Chi collassa questi strati in un unico giudizio binario — i sostenitori del pre-Clovis quando usano la plausibilità ecologica come supporto per siti con stratigrafia dubbia; i critici quando usano l'assenza di evidenze in Nord America come confutazione di siti sudamericani — commette un errore logico strutturale che questa monografia si propone di evitare in modo sistematico.

I.2 Il contesto storiografico: nascita, consolidamento ed erosione del paradigma Clovis First

Il paradigma "Clovis First" acquisì la sua forma canonica attraverso un processo lungo mezzo secolo, che comincia con la scoperta dei siti eponimi di Folsom (1927) e Clovis (1929–1933) e culmina nella sistematizzazione teorica di Paul Martin e C. Vance Haynes negli anni Sessanta. La storia di questo processo non è semplicemente la storia di come alcune scoperte implicassero un certo modello: è la storia di come un modello si costruì attorno a certe scoperte, escludendo progressivamente le evidenze incompatibili attraverso una serie di ipotesi ausiliarie che furono accettate — spesso implicitamente, senza esame critico — come parte del framework metodologico della disciplina.

Paul Martin (1967, Nature: "Prehistoric overkill") costruì attorno alla cultura Clovis il modello della "blitzkrieg": una piccola banda di cacciatori penetrata in Nord America attraverso il corridoio ice-free beringiano ca. 13.500 anni fa si sarebbe espansa a velocità sorprendente verso sud, spingendosi fino alla Tierra del Fuego in meno di 1.000 anni, sterminando lungo il percorso la megafauna pleistocenica che non aveva mai incontrato prima i bipedi cacciatori e non aveva sviluppato alcun comportamento difensivo nei loro confronti.

Il modello di Martin aveva tre qualità che lo rendevano straordinariamente attrattivo. Primo, era coerente internamente: la stessa ondata di colonizzatori spiegava sia la data di arrivo (compatibile con le prime punte Clovis) sia il pattern di estinzione della megafauna (il cui timing seguiva da vicino la diffusione di Clovis). Secondo, era matematicamente elegante: Martin calcolava che una popolazione fondatrice di 100 individui, con un tasso di crescita realistico del 3,4% annuo e una velocità di avanzamento del fronte di 16 km/anno, avrebbe potuto produrre i pattern osservati di distribuzione delle date Clovis.

Terzo, era minimalista: richiedeva una sola ondata migratoria, un solo momento di arrivo, un solo agente causale per l'estinzione, in accordo con il rasoio di Occam come regola metodologica operativa.

C. Vance Haynes (1964, *Science*; 1969, *American Antiquity*) aggiunse al modello l'armatura stratigrafica: il "black mat" — lo strato organico scuro visibile in decine di siti del Nordamerica — segnava il confine netto tra i depositi con megafauna e manufatti Clovis (al di sotto e all'interno del mat) e i depositi successivi privi di megafauna (al di sopra). Haynes interpretò l'assenza sistematica di manufatti al di sotto del black mat come evidenza dell'assenza di esseri umani prima di Clovis: argomento che, nel suo nucleo logico, inverte l'onere della prova (l'assenza di evidenza è trattata come evidenza dell'assenza) ma che, data la densità e la qualità delle survey disponibili fino agli anni Ottanta, sembrava ragionevole.

L'eleganza del sistema non deve però nascondere i suoi presupposti non esaminati. Il modello di Martin assumeva implicitamente che il corridoio ice-free fosse percorribile in forma di stecca nord-sud — ma la ricostruzione paleoglaciologica moderna mostra che il corridoio era probabilmente chiuso o appena aperto durante le fasi più fredde del Tardo Pleistocene, e che le sue condizioni ecologiche durante l'apertura non erano necessariamente adatte al sostentamento di popolazioni umane in transito.

L'assenza di siti al di sotto del black mat poteva riflettere non l'assenza di esseri umani, ma la diversa distribuzione spaziale, la diversa intensità di uso del territorio, o la minore probabilità di rilevazione per siti molto più antichi in un substrato che aveva poi subito modificazioni pedologiche significative. Nessuno di questi problemi era evidente o urgente finché il modello restava coerente con le evidenze disponibili — e il paradigma, come tutti i paradigmi consolidati, aveva una capacità straordinaria di reinterpretare le evidenze potenzialmente anomale come casi particolari delle sue predizioni generali.

La prima crepa sistematica fu Meadowcroft Rockshelter in Pennsylvania, scavato da James Adovasio a partire dal 1973. I livelli più profondi di Meadowcroft contenevano manufatti litici in associazione con date radiocarboniche che si estendevano, nei campioni più antichi, fino a 16.000–19.000 anni BP non calibrati — significativamente prima di Clovis. Le reazioni del mainstream furono intense: Haynes e altri critici sollevarono obiezioni sul possibile inquinamento dei campioni da carbonio fossile (il sito si trova in un'area dove l'acqua di falda è ricca di carboni fossili dissolti, che abbasserebbero artificialmente le date riducendo la proporzione di ^{14}C nei

campioni), e sulla possibilità che i manufatti si trovassero in posizione secondaria rispetto alle date.

Adovasio rispose punto per punto a ciascuna obiezione, spesso con argomenti convincenti, ma non riuscì a chiudere il dibattito — parzialmente perché la questione del carbonio fossile è genuinamente difficile da escludere con assoluta certezza, e parzialmente perché la comunità degli americanisti era strutturalmente resistente. Più di cinquant'anni dopo la scoperta, Meadowcroft rimane in una zona grigia: le sue evidenze non sono state confutate, ma non hanno ottenuto il riconoscimento formale di Monte Verde.

La seconda crepa, e quella che si rivelò decisiva, fu Monte Verde nel Cile meridionale, scoperto e scavato da Tom Dillehay a partire dal 1977. A differenza di Meadowcroft — un riparo sotto roccia in un'area geologicamente complicata — Monte Verde era un sito a cielo aperto in una torbiera che aveva conservato materiali organici con una fedeltà eccezionale: resti di strutture in legno, focolari, resti alimentari vegetali, persino un frammento di cuoio ancora attaccato a un paletto. La componente principale del sito (MV-II) era datata a ca. 14.600–14.800 anni calibrati BP su campioni di legno e osso con associazione stratigrafica diretta agli oggetti culturali.

Il panel di esperti del 1997 — composto da dieci specialisti tra cui alcuni dei critici più autorevoli del pre-Clovis, che visitarono il sito e revisionarono la documentazione per una settimana intera — concluse che MV-II era un sito umano autentico datato prima di Clovis. La pubblicazione del resoconto del panel su American Antiquity (1997) segnò una svolta formale: per la prima volta, il paradigma Clovis First fu riconosciuto dalla comunità mainstream come falsificato almeno nella sua versione più rigida.

Ma la svolta fu più limitata di quanto avrebbe potuto essere. L'accettazione di Monte Verde non aprì automaticamente le porte agli altri siti pre-Clovis rivendicati. Al contrario, la comunità sembrò aver stabilito una soglia implicita: siti nell'intervallo 14.000–16.000 anni calibrati potevano essere accettati; siti che rivendicavano date di 20.000 anni o più rimanevano nel territorio della contestazione severa, e il peso della prova richiesto per l'accettazione sembrava aumentare non linearmente con l'antichità rivendicata.

Questa asimmetria nel trattamento delle evidenze — di cui si dà conto sistematico nel Capitolo V — è uno dei fenomeni più rilevanti del dibattito dal punto di vista epistemologico. Essa mostra che la revisione del paradigma Clovis First non fu una sostituzione di un framework con un altro, ma una rinegoziazione parziale e asimmetrica dei confini del legittimamente accettabile — il che è, storicamente, la modalità più comune di revisione paradigmatica nella scienza normale.

I.3 La struttura dell'argomento ex silentio e i suoi limiti analitici

Uno degli argomenti più utilizzati nella difesa del paradigma Clovis First era — ed è, nelle sue versioni più recenti — l'argomento *ex silentio*: in Nord America, dove le survey archelogiche sono le più sistematiche e dense al mondo, l'assenza di siti indisputabilmente pre-Clovis è evidenza della loro assenza reale. Questo argomento merita una valutazione formale perché la sua forza probante è spesso sopravvalutata.

Il peso epistemico dell'argomento *ex silentio* dipende, in modo critico, dalla probabilità di rilevazione del fenomeno che si sostiene assente — la cosiddetta *detection probability* D. Se la probabilità di rilevare un sito umano di 20.000 anni fosse vicina a 1, allora l'assenza di rilevazioni sarebbe fortemente contraria all'ipotesi della presenza; se D fosse vicina a 0, l'assenza sarebbe quasi priva di contenuto informativo. In forma bayesiana: l'evidenza *"nessun sito pre-Clovis trovato"* aggiorna la credenza sull'ipotesi $H_{pre-Clovis}$ proporzionalmente a *1 - D*, non a *1*.

Per i siti nordamericani datati a 20.000 anni cal BP, D dipende da una serie di fattori che ne riducono drasticamente il valore: la percentuale di territorio effettivamente scavata in contesti stratigraficamente adatti (stimata in meno del 2% per il territorio nordamericano al di fuori di alcune aree intensamente studiate come la Columbia Plateau e le Great Plains), il grado di preservazione dei materiali organici in suoli di diverse composizioni (i suoli acidi delle foreste temperata e boreale del Nord America distruggono praticamente tutto il collagene e gran parte del legno in meno di qualche migliaio di anni), la diversità delle tipologie di sito riconoscibili (l'archeologia nordamericana si è tradizionalmente orientata verso i siti di caccia con megafauna e verso i siti fluviali, potenzialmente perdendo siti di accampamento di bassa intensità in zone costiere o montane).

Una stima ragionevole di D per un sito umano di 20.000 anni in Nord America è nell'ordine del 5–15% — un valore abbastanza basso da ridurre la forza dell'argomento ex silentio a livelli compatibili con qualsiasi scenario demografico plausibile.

Questo non significa che l'argomento sia privo di valore. Ma significa che il suo valore dipende da una stima esplicita di D, e che questa stima dipende a sua volta da dati paleoclimatici, tafonomici, e di survey intensity che raramente sono discussi nei lavori che invocano l'argomento. La mancanza di siti pre-Clovis in Nord America è compatibile sia con l'assenza reale sia con la non-rilevabilità dati i mezzi disponibili — e la distinzione tra le due interpretazioni richiede argomenti specifici che vanno al di là della semplice constatazione dell'assenza.

I.4 La struttura dell'opera e il metodo del benchmark comparativo

Questa monografia è strutturata in sei capitoli analitici che seguono una progressione logica: dalle basi metodologiche (Capitolo I, datazione e certificazione dei siti), all'analisi empirica caso per caso (Capitolo II, i siti), alle implicazioni paleoecologiche (Capitolo III, megafauna e paleoambienti), all'analisi genetica (Capitolo IV, coalescenza e bottleneck), all'analisi epistemologica (Capitolo V, conservatorismo paradigmatico), alla sintesi quantitativa (Capitolo VI, distribuzione bayesiana del tempo di colonizzazione).

Un principio metodologico che governa tutta la trattazione è l'uso sistematico del benchmark comparativo — il ricorso a casi storici di revisione paradigmatica analoghi per struttura, per calibrare le proprie aspettative su come si comportano i sistemi di conoscenza istituzionalizzati di fronte alle evidenze anomale. I benchmark naturali per il dibattito pre-Clovis sono almeno tre.

Il primo è la controversia sulla deriva dei continenti: la proposta di Wegener (1912), sostenuta da evidenze morfologiche e paleontologiche di grande qualità, fu rifiutata per oltre quarant'anni dalla comunità geologica prima che la scoperta dell'espansione del fondo oceanico nei primi anni Sessanta producesse la rivoluzione della tettonica a placche. La struttura della resistenza — obiezione al meccanismo piuttosto che alle evidenze, richiesta di un'evidenza-chiave che servisse da "smoking gun" mentre si ignoravano le evidenze convergenti di diversi ordini — è sorprendentemente simile a quella del dibattito pre-Clovis.

Il secondo è la controversia sul ruolo dei processi catastrofici in geologia, che riemerse negli anni Ottanta con la proposta di Alvarez (1980) sull'impatto meteorico come causa dell'estinzione del K-Pg. La proposta fu inizialmente rifiutata con argomenti analoghi a quelli usati contro il pre-Clovis (impossibilità fisica, assenza di altri indicatori, dipendenza da un unico tipo di evidenza), e fu poi accettata nell'arco di un decennio grazie all'accumulo di evidenze convergenti di tipo diverso.

Il terzo è la storia del riconoscimento dei siti paleolitici europei nel XIX secolo: i manufatti bifacciali del "Diluvium" scoperto da Boucher de Perthes a Abbeville negli anni Quaranta dell'Ottocento furono rifiutati per oltre vent'anni prima di essere accettati come prove di antichità umana, esattamente con gli

stessi argomenti (geofatti, depositi rimaneggiati, impossibilità di tale antichità) che sarebbero stati usati un secolo e mezzo più tardi contro i siti pre-Clovis americani.

Queste analogie non dimostrano che il pre-Clovis estremo sia corretto — le analogie storiche non provano i contenuti empirici, ma solo illuminano i pattern istituzionali della resistenza e revisione. Ciò che provano è che la resistenza iniziale di una comunità scientifica a evidenze anomale non è, di per sé, evidenza contro le evidenze: è un fenomeno sociologico prevedibile che deve essere separato, analiticamente, dalla valutazione del contenuto epistemico delle evidenze stesse.

Prosegue con il Capitolo I: Metodologie per la datazione e la certificazione dei siti pre-Clovis

Capitolo I — Metodologie per la datazione e la certificazione dei siti pre-Clovis: fondamenti tecnici, problemi pratici e nuovi sviluppi

1.1 Il radiocarbonio: principi, limitazioni e progressi recenti

La datazione al radiocarbonio (^{14}C) è lo strumento cronometrico principale per il periodo 10.000–50.000 BP — esattamente l'intervallo temporale più rilevante per il dibattito pre-Clovis. Comprendere i suoi principi, le sue fonti di errore, e i progressi metodologici degli ultimi due decenni non è un esercizio preliminare di carattere propedeutico, ma una precondizione epistemica senza la quale nessuna valutazione critica dei siti è possibile: le dispute più aspre del dibattito pre-Clovis si giocano spesso a questo livello, e la mancanza di familiarità con le basi tecniche del metodo produce sistematicamente errori di valutazione sia nei propositori che nei critici.

Il ^{14}C è prodotto nell'alta atmosfera dall'interazione dei raggi cosmici con gli atomi di azoto: i neutroni secondari prodotti dalla spallazione nucleare si combinano con ^{14}N per produrre ^{14}C, che si ossida rapidamente a $^{14}CO_2$ e viene incorporato nel ciclo del carbonio globale. Gli organismi viventi scambiano carbonio con l'atmosfera per tutta la loro vita, mantenendo un rapporto $^{14}C/^{12}C$ approssimativamente costante e uguale a quello dell'atmosfera contemporanea; alla morte, lo scambio cessa e il ^{14}C decade con una emivita di 5.730 anni (costante fisica di Libby: 5.568 anni, usata per convenzione nel calcolo delle date "convenzionali" non calibrate).

La misura del rapporto $^{14}C/^{12}C$ residuo nel campione, confrontata con il rapporto contemporaneo nell'atmosfera, fornisce l'età del campione in "anni radiocarbionici" BP.

Il problema fondamentale della datazione ^{14}C è che il rapporto $^{14}C/^{12}C$ nell'atmosfera non è stato costante nel tempo: le variazioni dell'attività solare, del campo magnetico terrestre, e degli scambi con i reservoir oceanici producono oscillazioni del rapporto atmosferico che possono essere del 3–5% su scala secolare e fino al 10–20% su scale temporali più lunghe. Queste variazioni significano che la corrispondenza tra "anni radiocarbionici" e anni calendari non è lineare: deve essere "calibrata" usando curve di calibrazione costruite su campioni con età calendaria indipendentemente nota (anelli di alberi per il periodo 0–14.000 BP, coralli e speleotemi per il periodo più antico).

La curva di calibrazione attualmente standard è IntCal20 (Reimer et al. 2020, Radiocarbon), prodotta dall'integrazione di oltre 15.000 misurazioni di campioni con età calendaria indipendente — la sintesi più completa mai realizzata, che ha prodotto

revisioni anche significative rispetto alle versioni precedenti (IntCal13, IntCal09) in alcune finestre temporali critiche per il dibattito pre-Clovis.

La calibrazione introduce un elemento di complessità che il dibattito pre-Clovis tratta spesso in modo inadeguato: le età calibrate non sono date precise ma distribuzioni di probabilità sull'asse del tempo calendare. Quando una curva di calibrazione ha un "plateau" — un'area dove la curva è piatta e molte età radiocarbioniche si accumulano sullo stesso valore calendare — la calibrazione produce distribuzioni molto larghe, con intervalli di confidenza al 95% che possono coprire mille anni o più. Il plateau intorno a 10.000–10.500 anni BP non calibrati, corrispondente al tardo Dryas Recente, è il più noto; ma la finestra intorno a 12.000–13.500 BP non calibrati — direttamente rilevante per la datazione dei siti Clovis e dei primi siti pre-Clovis accettati — presenta irregolarità significative in IntCal20 rispetto alle versioni precedenti della curva, con revisioni delle date calibrate fino a 200–400 anni.

La comunicazione pubblica dei risultati di datazione — che cita quasi invariabilmente una singola data senza specificare la distribuzione di probabilità sottostante — è sistematicamente fuorviante e contribuisce a false certezze nel dibattito.

Un secondo problema strutturale è il limite superiore del metodo. Poiché il ^{14}C decade con emivita di 5.730 anni, dopo 10 emivite (ca. 57.300 anni) la quantità residua è ca. 1/1024 della quantità iniziale — una concentrazione di circa 0,00024 pCi/g, al limite o al di sotto della sensibilità analitica degli spettrometri di massa a ionizzazione con acceleratore (AMS) più avanzati. In pratica, la finestra di applicabilità affidabile del ^{14}C si estende fino a ca. 45.000–50.000 anni BP in condizioni ottimali (campioni con alto contenuto di carbonio, contaminazione zero, misurazioni multiple): oltre questa soglia, qualsiasi data "finita" — cioè non reportata come ">45.000 BP" o ">50.000 BP" — deve essere trattata con estrema cautela come possibilmente distorta da contaminazione moderna.

Anche quantità minime di carbonio moderno abbassano l'apparente età di campioni molto antichi in modo non lineare: per un campione di 50.000 anni, una contaminazione dell'1% di carbonio moderno produce un abbassamento apparente dell'età di circa 7.000 anni, riportando una data di ~43.000 BP invece della vera ~50.000 BP. Questo effetto — asimmetrico (la contaminazione abbassa sempre l'età apparente, non la alza) e non lineare (il suo effetto è proporzionalmente più grande per campioni più antichi) — è la ragione principale per cui le date molto antiche richiedono un grado di attenzione metodologica qualitativamente diverso dalle date più recenti.

1.1.1 Il pretrattamento chimico: il tallone d'Achille della datazione ^{14}C

Il pretrattamento chimico dei campioni prima della misurazione AMS è, nella pratica dei laboratori di datazione, il punto critico che determina la qualità delle date più antiche. L'obiettivo del pretrattamento è rimuovere il carbonio contaminante — il carbonio moderno che può aver penetrato il campione per diffusione biologica (radici, microrganismi), per movimento di acido umico attraverso il profilo stratigrafico, o per manipolazione in laboratorio — lasciando intatto il solo carbonio dell'organismo datato.

Il protocollo standard per il materiale organico (ossa, legno, carbone) è il protocollo ABA (Acid-Base-Acid): il campione viene trattato con acido cloridrico (HCl) diluito per rimuovere i carbonati, poi con idrossido di sodio (NaOH) per rimuovere gli acidi umici, poi di nuovo con HCl per neutralizzare il NaOH. Per le ossa, il protocollo preferito è l'estrazione del collagene — la proteina strutturale dell'osso, che è chimicamente stabile e molto meno soggetta a contaminazione delle frazioni inorganiche — con criteri di qualità sull'indice C:N atomico (valori accettabili: 2,9–3,6) e sul contenuto percentuale di azoto (valori accettabili: >0,5% secondo Stafford et al. 2012).

Per il carbone di legna, il protocollo preferito include la separazione e la datazione individuale di singoli frammenti identificabili botanicamente (single entity dating) per evitare l'averaging di campioni di età diverse nella stessa aliquota, che potrebbe introdurre date intermedie non corrispondenti ad alcun evento reale. Per i semi e altri macroresti botanici — il materiale ottimale per la datazione di contesti pre-Clovis — il pretrattamento ABA produce risultati eccellenti quando i campioni provengono da contesti anaerobici (torbiere, sedimenti saturi d'acqua) che hanno impedito la decomposizione biologica.

La qualità del pretrattamento è un'informazione che dovrebbe essere riportata in tutte le pubblicazioni di datazione ^{14}C ma spesso non lo è — specialmente nelle pubblicazioni di dataset più vecchi, degli anni Settanta–Novanta, che formano la base delle rivendicazioni per i siti pre-Clovis più antichi. Quando i laboratori non riportano i protocolli di pretrattamento, i parametri di qualità del collagene, e il numero di misurazioni indipendenti per ciascuna data, è impossibile valutare l'affidabilità delle date stesse.

Questa lacuna nella reportistica è una delle ragioni per cui il dibattito pre-Clovis è spesso improduttivo: i critici sollevavano obiezioni sul pretrattamento, i propositori rispondevano che il pretrattamento era stato adeguato, ma in assenza di dati pubblicati il dibattito era non risolvibile empiricamente. La progressiva standardizzazione internazionale delle linee guida di reportistica (Millard 2014, Journal of Archaeological Science; Dee e Ramsey 2014, Radiocarbon) ha ridotto ma non eliminato questo problema nelle pubblicazioni più recenti.

Un problema specifico del pretrattamento che riveste importanza particolare per i siti pre-Clovis in ambienti tropicali — dove si trovano i siti brasiliani più contestati, incluso Pedra Furada — è la contaminazione da acidi umici profondi. Negli ecosistemi forestali tropicali, la decomposizione della materia organica produce grandi quantità di acidi umici e fulvici che percolano in profondità nel profilo stratigrafico, trasportando carbonio di età diversa — e tipicamente carbonio più recente — nei livelli più antichi.

La tradizionale fase alcalina del protocollo ABA è progettata per rimuovere questa contaminazione, ma la sua efficacia dipende dalla completezza dell'idrolisi alcalina, dalla concentrazione delle soluzioni usate, e dal tempo di trattamento. Nei campioni con alto contenuto di materiale umico — carbone da suoli forestali tropicali, per esempio — la fase alcalina può essere insufficiente e richiedere trattamenti aggiuntivi (filtraggio di dimensione molecolare, cromatografia su gel Sephadex) che non sono stati sistematicamente applicati a molti dei campioni di Pedra Furada e di altri siti tropicali.

1.1.2 La spettrometria di massa con acceleratore (AMS): principi e vantaggi

La spettrometria di massa con acceleratore (AMS, Accelerator Mass Spectrometry) ha rivoluzionato la datazione al radiocarbonio negli ultimi quarant'anni, riducendo la quantità di campione necessaria da grammi a milligrammi e aumentando la precisione delle misurazioni di un ordine di grandezza rispetto alla precedente tecnica di conteggio per decadimento. L'AMS separa gli ioni di ^{14}C dagli altri ioni del campione attraverso un campo magnetico, permettendo di misurare direttamente il rapporto $^{14}C/^{12}C$ senza aspettare il decadimento radioattivo.

La riduzione della quantità di campione necessaria ha due conseguenze fondamentali: da un lato, permette di datare materiali rari o preziosi (singoli semi, microfossili, resti di insetti) che non sarebbero stati disponibili in quantità sufficiente per la tecnica convenzionale; dall'altro, e più importante per il dibattito pre-Clovis, permette il single entity dating di macroresti botanici individuali, eliminando il problema dell'averaging di campioni misti.

Un avanzamento recente di grande rilevanza per il dibattito è lo sviluppo dell'AMS ad alta sensibilità con soppressione del background — spettrometri della terza generazione come quelli installati negli ultimi anni all'ETH di Zurigo e all'AMS facility dell'Università di Groningen — che spingono il limite superiore del metodo fino a ca. 60.000–65.000 anni BP in condizioni ottimali di pretrattamento. Questa estensione è cruciale per la valutazione dei siti che rivendicano date nell'intervallo 45.000–65.000 BP, che con gli spettrometri precedenti cadevano in una zona di ambiguità tra "finita ma vecchia" e ">45.000

BP". I risultati di queste nuove analisi, dove disponibili, sono citati nella discussione dei singoli siti.

1.1.3 Metodi alternativi: OSL, ESR, U-series, paleomagnetismo

Per i siti che rivendicano date oltre i 50.000 anni — e per la corroborazione indipendente dei siti nel range 20.000–50.000 anni — si ricorre a metodi di datazione alternativi al ^{14}C. I principali sono la luminescenza otticamente stimolata (OSL), la risonanza di spin elettronico (ESR), le serie dell'uranio (U-series), e il paleomagnetismo. Ciascuno ha basi fisiche diverse, finestre di applicabilità diverse, e fonti di errore diverse — il che rende la concordanza tra metodi diversi uno dei test più robusti dell'affidabilità cronologica disponibili.

La OSL (Optically Stimulated Luminescence) misura la dose di radiazione ionizzante accumulata nel reticolo cristallino di minerali silicatici (quarzo, feldspato) dalla loro ultima esposizione alla luce. Al momento della deposizione di un sedimento, i cristalli di quarzo vengono "azzerati" (bleached) dall'esposizione alla luce solare; nel sedimento sepolto, il reticolo accumula elettroni nelle trappole prodotte dai difetti cristallini, a una velocità proporzionale alla dose annua di radiazione dall'ambiente (il cosiddetto annual dose rate).

La misurazione della luminescenza emessa dal campione irradiato in laboratorio, combinata con la stima del dose rate ambientale, fornisce l'età di deposizione del sedimento. L'OSL ha il vantaggio cruciale di poter datare direttamente i sedimenti in cui si trovano i manufatti — eliminando il problema del materiale intruso o in posizione secondaria — e ha una finestra di applicabilità che si estende fino a ca. 200.000–500.000 anni in condizioni ottimali. Per il dibattito pre-Clovis, l'OSL è applicabile a quasi tutti i siti rilevanti e fornisce, dove disponibile, il test di corroborazione più diretto.

Le sue fonti di errore principali sono: il bleaching incompleto dei cristalli al momento della deposizione (se i cristalli non erano stati completamente esposti alla luce prima della deposizione — per esempio in sedimenti depositati in acque torbide o in condizioni di scarsa illuminazione — la data misurata sovrastima l'età reale del sedimento); la variabilità spaziale del dose rate ambientale (la presenza di materiali con alta radioattività naturale nelle immediate vicinanze del campione modifica il dose rate e deve essere misurata in situ); l'anomalous fading nei feldspati (una perdita lenta di carica nelle trappole cristalline che sottostima l'età reale).

Il protocollo SAR (Single Aliquot Regenerative, Murray e Wintle 2000) ha ridotto significativamente il problema del bleaching parziale identificando e scartando i grani non completamente azzerati attraverso un test di pretrattamento che misura la luminescenza residua di ciascun grano individuale prima della misurazione principale.

La ESR (Electron Spin Resonance) misura la concentrazione di centri paramagnetici nello smalto dentale dei denti di animali fossili, prodotti dall'irradiazione ambientale nel corso del tempo. È applicata principalmente ai denti di animali fossili che in molti siti sono i soli materiali databilidad oltre i limiti del ^{14}C. La complessità metodologica principale risiede nella modellizzazione dell'assorbimento dell'uranio nello smalto nel corso del tempo: il modo in cui l'uranio viene assorbito dopo la morte del dente influenza il dose rate ricevuto dai cristalli, e diversi modelli di uptake (Early Uptake, Late Uptake, o modelli lineari intermedi) producono stime d'età significativamente diverse.

La combinazione ESR+U-series, che stima congiuntamente l'età e il parametro di uptake attraverso misurazioni di U e Th sul dente e sullo smalto, è considerata più robusta dei modelli di uptake fissi.

Le serie dell'uranio sfruttano il decadimento dell'uranio-238 a torio-230 (emivita 75.200 anni). I carbonati formati in sistemi chimicamente chiusi — stalattiti, coralli, smalto dentale — incorporano uranio ma escludono il torio, in modo che al momento della formazione il rapporto $^{230}Th/^{234}U$ è zero. Il rapporto aumenta con il tempo secondo la legge di decadimento, fornendo la data di formazione. Applicata alle speleotemi che sigillano o ricoprono depositi archeologici, le U-series possono fornire termini *ante quem* molto precisi per i depositi sottostanti.

1.2 Criteri per la certificazione di un sito come genuinamente pre-Clovis

La valutazione di un sito pre-Clovis richiede l'applicazione di criteri multipli convergenti. Nella letteratura specialistica si trovano formulazioni diverse di questi criteri, che convergono tuttavia su un nucleo condiviso. La sintesi più utile per i nostri scopi è quella implicita nel processo di valutazione del panel di Monte Verde (1997), che può essere ricostituita dall'analisi del report e dagli articoli correlati, e che può essere integrata con le revisioni metodologiche di Meltzer (2009) e di Waters e Stafford (2007).

Il primo criterio è l'associazione stratigrafica incontrovertibile tra manufatti e datazioni. Il semplice fatto che manufatti e materiale databile si trovino nello stesso metro quadro di scavo non è sufficiente per stabilire la loro associazione temporale. La stratigrafia del deposito deve essere analizzata in modo da dimostrare che il materiale datato e i manufatti si trovavano nello stesso orizzonte deposizionale — un'affermazione che richiede la micromorfologia delle sezioni sottili del sedimento (che rivela eventi di disturbo a scala millimetrica), la distribuzione spaziale tridimensionale degli oggetti (che deve essere congruente con le strutture deposizionali naturali), la

stima delle dimensioni delle particelle sedimentarie (che rivela rimescolamento alluvionale o eolico), e la valutazione di tutti i processi bioturbativi e geoturbativi potenzialmente attivi nel sito.

La micromorfologia, in particolare, è diventata uno strumento indispensabile dalla fine degli anni Ottanta grazie allo sviluppo di protocolli di campionamento, impregnazione e analisi delle sezioni sottili da sedimenti archeologici elaborati principalmente da Paul Goldberg e Richard Macphail: essa permette di identificare la presenza di pori da radici riempiti di sedimento di età diversa, di pseudomorfosi di macchie organiche redistribuite, di aggregati di materia organica di origine alloctona — tutti indicatori di rimescolamento post-deposizionale invisibili all'analisi macroscopica.

Il secondo criterio è la natura inequivocabilmente antropogenica dei manufatti o delle tracce biologiche. Questa distinzione è genuinamente difficile nei contesti più antichi, dove la pressione tafonomica e diagenetica sulle superfici litiche può produrre morfologie che assomigliano alla lavorazione intenzionale, e dove le marcature su ossa possono essere prodotte da carnivori, da calpestamento, o da processi di esposizione e rimodellazione superficiale. I criteri per distinguere manufatti da geofatti includono: la presenza di un cono di Hertz riconoscibile sulla piattaforma di percussione (indicativo di percussione intenzionale su materiale rigido), l'organizzazione sistematica delle cicatrici di scheggiatura in un pattern compatibile con una sequenza di riduzione pianificata, la presenza di tracce d'uso (use-wear) sulle superfici attive identificabili attraverso traceologia ad alta risoluzione, e — criterio cruciale — la valutazione della concordanza inter-osservatore su campioni blind, cioè senza che i valutatori sappiano quale ipotesi si sta testando.

Il fatto che in alcuni siti specialisti qualificati sono in disaccordo sulla natura antropogenica degli oggetti è di per sé un segnale di evidenza debole.

Il terzo criterio è la presenza di **date concordanti su materiali diversi**. Una singola data su un singolo campione — anche con un eccellente pretrattamento e un'incertezza analitica piccola — non costituisce evidenza cronologica robusta. I siti con le evidenze più robuste hanno date multiple (>5 è un numero minimo ragionevole per un sito complesso) concordanti su materiali di diversa natura chimica (carbone, osso, seme, legno) da contesti stratigraficamente separati. La concordanza delle date da materiali diversi è il test più potente contro la contaminazione sistematica: è altamente improbabile che contaminanti diversi producano lo stesso bias in campioni di natura chimica diversa, e una concordanza su più materiali riduce la probabilità di un'anomalia sistematica a livelli molto bassi.

Il quarto criterio è la **corroborazione da metodi di datazione alternativi**. Date ^{14}C concordanti con date OSL sullo stesso deposito, o con date U-series su speleotemi associate, aumentano in modo molto significativo la robustezza della cronologia. Come discusso nella sezione precedente, ogni metodo ha fonti di errore diverse, e la concordanza tra metodi diversi riduce drasticamente la probabilità che il risultato sia un artefatto metodologico.

Il quinto criterio è la replicabilità e l'accesso indipendente. Un sito le cui evidenze sono state analizzate solo dall'equipe che lo ha scavato, senza accesso ai materiali da parte di ricercatori indipendenti, ha necessariamente un peso epistemico inferiore a un sito che ha subito l'analisi critica di osservatori con diverse prospettive e diverse competenze. Questo criterio ha una storia delicata nel dibattito pre-Clovis: sia Dillehay (Monte Verde) sia Adovasio (Meadowcroft) incontrarono difficoltà nell'ottenere accesso indipendente per critici della qualità di Haynes, e la resistenza istituzionale all'accesso indipendente fu interpretata da alcuni critici come prova di debolezza delle evidenze — quando potrebbe invece riflettere le difficoltà logistiche e finanziarie dell'accesso a siti remoti in paesi con procedure burocratiche complesse per l'esportazione di materiali.

1.2.1 Il problema della soglia asimmetrica e la sua formalizzazione

Un'osservazione metodologica fondamentale riguarda la simmetria (o l'asimmetria) nei criteri di accettazione applicati alle diverse ipotesi cronologiche. La domanda è: i criteri applicati per accettare un sito come genuinamente pre-Clovis sono uguali, più stringenti, o meno stringenti di quelli applicati per accettare un sito come genuinamente Clovis?

Un argomento per l'asimmetria legittima è che le ipotesi più straordinarie richiedono evidenze più straordinarie (principio di Sagan-Hume): una data di 14.000 anni sfida il paradigma in modo moderato; una data di 40.000 anni sfida l'intero schema del popolamento tardivo in modo molto più profondo, quindi è razionale richiedere un'evidenza proporzionalmente più robusta. Questo principio è corretto ed è la base razionale del conservatorismo epistemico.

Un argomento contro l'asimmetria illegittima è che, storicamente, i siti Clovis accettati come tali non erano documentati con il rigore ora richiesto ai siti pre-Clovis. Waters e Stafford (2007, Science: "Redefining the Age of Clovis") ridatarono sistematicamente con AMS e pretrattamento rigoroso tutti i siti Clovis accettati nella letteratura: il risultato fu che le date affidabili si concentravano nell'intervallo 13.250–12.800 anni cal BP — molto più compresso del range 13.500–12.800 anni che la letteratura precedente riportava — e che numerose date Clovis accettate si basavano su

campioni con pretrattamento inadeguato o su materiale in posizione potenzialmente secondaria.

Questo significa che la base empirica del paradigma Clovis First era essa stessa meno solida di quanto la discussione sul pre-Clovis assumesse come punto di partenza non problematizzato.

La formalizzazione di questa asimmetria può essere espressa come segue. Sia τ(T) il peso della prova (in unità di likelihood ratio minima accettabile, cfr. Capitolo V) richiesto per accettare un sito di età T. Una funzione τ(T) crescente con T è razionalmente motivata, ma la sua forma funzionale deve essere specificata a priori e non deve essere aggiustata post hoc in risposta all'evidenza osservata. Se si sceglie una relazione lineare τ(T) = τ_0 · (T/T_{Clovis}), un sito di 26.500 anni richiederebbe una LR doppia rispetto a un sito Clovis; una relazione quadratica richiederebbe una LR quattro volte maggiore.

Il problema storico del dibattito pre-Clovis è che il parametro di crescita non fu mai specificato a priori: la soglia fu rivista implicitamente verso l'alto ogni volta che un sito sembrava avvicinarsi ad essa, in modo tale che nessun singolo sito (prima di Monte Verde) riuscì a superarla.

1.3 La matematica della colonizzazione: modelli demografici e implicazioni cronologiche

Prima di procedere all'analisi caso per caso dei siti, è utile sviluppare la struttura matematica dei modelli demografici di colonizzazione, che fornisce un quadro di riferimento per valutare la plausibilità di ciascun scenario cronologico. La domanda è: che tipo di processo demografico è necessario per produrre una presenza umana nelle Americhe nelle date rivendicate dai vari siti?

1.3.1 Il modello di colonizzazione a onda di espansione

Il modello più semplice per la diffusione demografica in un territorio non ancora occupato è il modello di Fisher-KPP (Kolmogorov-Petrovsky-Piskunov, 1937), che combina la crescita logistica locale con la diffusione spaziale:

dove $n(x, t)$ è la densità di popolazione nella posizione x al tempo t, r è il tasso intrinseco di crescita, K è la carrying capacity locale, e D è il coefficiente di diffusione spaziale. Fisher dimostrò che questo sistema evolve verso un'onda viaggiante con velocità asintotica $v^{*} = 2\sqrt{rD}$. Il modello di Martin (1967) usava implicitamente questa struttura con $r = 0,034$ e $v = 16$ km/anno, ottenendo un coefficiente di diffusione

$D \approx 1882$ km²/anno — corrispondente a una distanza di diffusione media annua di circa 61 km, biologicamente plausibile per cacciatori-raccoglitori ad alta mobilità.

Il problema con il modello di Martin applicato al scenario pre-Clovis è che una colonizzazione iniziata 20.000 anni fa invece di 13.500 anni fa, con la stessa popolazione finale a Clovis, implicherebbe un fronte di colonizzazione più lento — nell'ordine di 2–3 km/anno invece di 16 km/anno — e quindi un D molto più piccolo. Questo è compatibile con popolazioni di bassa densità con mobilità ridotta, o con un territorio più difficile da colonizzare di quanto il modello di Martin assumesse: le foreste boreali e le tundre artiche del subcontinente americano durante il LGM erano ambienti molto meno produttivi della mammoth steppe beringiana, e la carrying capacity per cacciatori-raccoglitori non specializzati era probabilmente molto più bassa di quella postulata da Martin.

Una conseguenza importante di questo calcolo è che la colonizzazione più lenta implicata dagli scenari pre-Clovis produce popolazioni di densità molto più bassa durante il LGM — dell'ordine di 0,001–0,005 individui/km² invece degli 0,01–0,05 individui/km² del modello Clovis First. Popolazioni così rade sarebbero estremamente difficili da rilevare nel record archeologico anche con survey sistematiche: la loro densità di siti per km² sarebbe dell'ordine di quello che ci si aspetterebbe da visite sporadiche di cacciatori nomadi, non da insediamenti stabili.

Questo calcolo fornisce un'argomentazione quantitativa a supporto della bassa detection probability discussa nell'Introduzione: non è paradossale che non troviamo siti di 20.000 anni; sarebbe sorprendente se li trovassimo con la densità attesa per siti più recenti. #### 1.3.2 Modelli stocastici e rischio di estinzione del fondatore Il modello di Fisher-KPP è deterministico: assume che la densità di popolazione vari in modo continuo e che le fluttuazioni casuali siano trascurabili. Questo è un'approssimazione inappropriata per le piccole popolazioni fondatrici nelle prime fasi della colonizzazione.

In questo regime, la dinamica demografica è dominata dalla stocasticità — dalle fluttuazioni casuali nei numeri di nascite e morti in ogni generazione — e il rischio di estinzione è elevatissimo. Per una popolazione che segue una dinamica di Galton-Watson, la probabilità di estinzione q di una linea fondata da un singolo individuo è la radice in $[0, 1]$ dell'equazione $q = G(q)$ dove G è la funzione generatrice dei momenti della distribuzione di prole. Per una distribuzione di Poisson con media $\mu > 1$, questa probabilità è la soluzione di $q = e^{\mu(q-1)}$: per $\mu = 1,1$ (crescita del 10% per generazione), $q \approx 0,533$.

Questo significa che una linea fondata da un singolo individuo ha più del 50% di probabilità di estinguersi anche con un tasso di crescita del 10% per generazione. Questa struttura ha un'implicazione diretta per la "invisibilità" delle presenze

pre-Clovis nel record genetico: anche se dei gruppi umani arrivarono nelle Americhe 30.000 o 40.000 anni fa, la probabilità che si siano estinti demograficamente prima di lasciare discendenti rilevabili nelle popolazioni moderne dipende dalle loro dimensioni iniziali.

Gruppi di 5–10 individui hanno una probabilità di sopravvivenza dell'ordine del 50–98% (a seconda del tasso di crescita) se raggiungono rapidamente dimensioni di sicurezza demografica, ma hanno una probabilità di estinzione molto alta se rimangono piccoli per molte generazioni. Non è necessario invocare catastrofi per spiegare l'assenza di segnale genetico nelle popolazioni moderne: la semplice stocasticità demografica di piccole popolazioni fondatrici è sufficiente. #### 1.3.3 Il modello di Meltzer per la colonizzazione a lungo termine e le sue implicazioni David Meltzer (2004, *American Antiquity*) ha sviluppato un modello analitico che stima la dimensione della popolazione nordamericana che sarebbe necessaria per produrre la densità di siti paleoindiani osservata nel record, a seconda della cronologia di arrivo.

Il risultato principale — che una colonizzazione più antica richiede meno fondatori per produrre la stessa densità di popolazione a Clovis, perché più tempo è disponibile per la crescita — è controintuitivo ma matematicamente conseguente. Per i parametri rilevanti: Con crescita del 1% annuo ($r = 0,01$), una colonizzazione a 20.000 anni fa potrebbe partire da appena 1–2 individui e produrre una popolazione di 100.000 individui a 13.000 anni fa; una colonizzazione a 13.500 anni fa richiederebbe invece un gruppo fondatore di 70–360 individui per lo stesso risultato.

Questo calcolo riduce la difficoltà demografica degli scenari pre-Clovis estremi: il problema non è la mancanza di fondatori, è la mancanza di evidenze della loro presenza. --- *Prosegue con il Capitolo II: I siti pre-Clovis — analisi sistematica caso per caso*

Capitolo II — I siti pre-Clovis: analisi sistematica caso per caso

2.1 Il corpus dei siti rivendicati: premessa critica alla tassonomia

La letteratura su potenziali siti pre-Clovis è vasta, disomogenea, e distribuita su un arco temporale di oltre cinquant'anni di ricerca con standard metodologici in continua evoluzione. Decine di siti sono stati proposti nel corso di questo mezzo secolo come evidenza di una presenza umana nelle Americhe prima di 13.500 anni cal BP; la loro valutazione richiede una tassonomia che tenga conto sia dell'antichità rivendicata sia dello stato del dibattito accademico — due dimensioni che non coincidono necessariamente, poiché un sito può rivendicare date moderate ma presentare evidenze eccezionalmente robuste, mentre un altro può avanzare rivendicazioni straordinarie su basi fragili.

Una classificazione operativa distingue quattro classi: la Classe A raccoglie i siti ampiamente accettati — Monte Verde MV-II (Cile, ca. 14.600 cal BP) e Paisley Caves (Oregon, ca. 14.290 cal BP); la Classe B comprende i siti seriamente contestati ma con evidenze robuste che mantengono il dibattito aperto — Meadowcroft Rockshelter, Bluefish Caves, Chiquihuite Cave, Cooper's Ferry; la Classe C include i siti con evidenze deboli o non risolte — Pedra Furada nei livelli oltre 25.000 BP, Topper; la Classe D raggruppa le rivendicazioni straordinarie oltre 60.000 anni — Cerutti Mastodon.

Questa tassonomia va trattata come ipotesi di lavoro soggetta a revisione caso per caso, non come verdetto finale: il dibattito è aperto e in evoluzione, e alcune collocazioni sono esse stesse contestate.

2.2 Monte Verde (Cile): anatomia di una rivoluzione paradigmatica

2.2.1 Contesto geografico, geologico ed ecologico

Monte Verde si trova a pochi chilometri dalla città di Puerto Montt, nel Cile meridionale (41,5°S), in una zona di foresta temperata pluviale Valdiviana sul Rio Chinchihuapi, affluente del Rio Maullin. Geograficamente, il sito si colloca in una posizione che avrebbe richiesto ai suoi occupanti di trovarsi nel Cile meridionale — circa 15.000 km di distanza lineare dalla testa di ponte beringiana più plausibile — almeno 14.600 anni fa, ovvero in un'epoca in cui il corridoio ice-free tra le calotte Laurenzide e Cordillerana era ancora chiuso o appena percorribile.

Questo dato geografico è forse il dato più vincolante dell'intera discussione pre-Clovis: non impone solo che esistessero esseri umani in America prima di Clovis, ma che fossero già giunti nell'estremo Sud del continente. La sua implicazione più

diretta non è la semplice falsificazione del timing Clovis, ma la falsificazione della rotta del corridoio interno come unico vettore del popolamento americano.

La caratteristica geologica che rende Monte Verde eccezionale — e senza la quale il sito avrebbe quasi certamente perso la grande maggioranza delle sue evidenze più significative — è la torbiera. Il sito è coperto da uno spesso strato di torba che, per le sue caratteristiche chimiche (pH basso, ambiente anaerobico, saturazione d'acqua costante), ha preservato materiali organici normalmente destinati alla rapida decomposizione in un contesto di foresta temperata umida. Il meccanismo di preservazione nella torba è fisicamente molto ben compreso: il pH acido (3,5–4,5 nella torba di sfagno, 4,5–5,5 nelle torbiere di transizione come quella di Monte Verde) inibisce l'attività dei microrganismi decompositori, in particolare dei batteri eterotrofi aerobici che sono i principali responsabili della degradazione proteica e polisaccaridica; l'anaerobiosi impedisce la respirazione aerobica e favorisce la formazione di acidi umici che agiscono da conservanti naturali per i polimeri organici.

Il risultato è che resti di legno lavorato, corde di fibra vegetale, resti alimentari (masticate e no), un frammento di cuoio ancora attaccato a un paletto, e tracce di pelli usate come pavimentazione di strutture erano praticamente intatti al momento dello scavo, dopo ca. 14.600 anni. Questa straordinaria conservazione è al tempo stesso un vantaggio enorme — fornisce un tipo e una qualità di evidenze senza precedenti nel record americano pre-Clovis — e una fonte di complicazioni analitiche: materiali organici ben conservati in torbiera sono vulnerabili a contaminazione durante lo scavo e il post-scavo (il contatto con aria ossigenata avvia processi di decomposizione rapida), e richiedono protocolli di campionamento, conservazione e analisi molto più controllati di quelli applicati normalmente a materiali litici o a carbone in contesti secchi.

2.2.2 Le evidenze culturali: strutture, focolari, manufatti e materiali botanici

La componente principale del sito (MV-II) copre un'area di circa 70 m² e mostra una struttura interna la cui densità informativa è semplicemente senza confronto nel record pre-Clovis delle Americhe.

Le strutture abitative sono definite da resti di legno lavorato che tracciano il perimetro di almeno due strutture rettangolari di circa 3×4 m e 4×5 m. I pali verticali erano infissi nel suolo a intervalli regolari di circa 50–80 cm, collegati da traverse orizzontali con corde di giunco (Juncus sp.) che mostrano tracce di lavorazione con strumenti taglienti; le impronte dei pali nel suolo organico sono ancora visibili come cilindri di materia organica compatta nel sedimento fine circostante. Frammenti di pelle identificati anatomicamente come pelle di mastodonte (Notiomastodon platensis, determinata dalla struttura istologica del derma e dall'associazione con ossa dello

stesso animale) erano usati come copertura o pavimentazione, con bordi tagliati in modo coerente con l'uso di uno strumento litico a filo continuo.

Questa è la struttura abitativa meglio documentata del Pleistocene superiore nelle Americhe, e la sua natura antropogenica non è mai stata seriamente contestata, nemmeno dai critici più severi come Fiedel.

I tre focolari distinti, definiti da pietre bruciate disposte in configurazione circolare con diametri di 40–60 cm, carbone e cenere in posizione primaria, costituiscono gli elementi stratigraficamente più vincolanti per la datazione. Il carbone di due focolari ha prodotto date ^{14}C AMS concordanti nell'intervallo 14.200–14.800 anni cal BP, con pretrattamento ABA, misurazioni multiple per campione, e indice d'accordo nella calibrazione superiore al 95%; il terzo focolare ha prodotto una data leggermente più giovane ma statisticamente sovrapponibile.

La concordanza tra i tre focolari — campioni indipendenti di carbone da strutture fisicamente separate, che hanno subito storie tafonomiche parzialmente diverse — è il test più diretto contro la contaminazione sistematica: la probabilità che tre campioni indipendenti siano stati contaminati in modo uguale e producano lo stesso errore sistematico è molto bassa.

I manufatti litici di Monte Verde sono, nella loro maggioranza, strumenti semplici su ciottolo: raschiatoi, grattatoi, boleadoras (pietre con strettoia perimetrale), qualche strumento a denticolatura irregolare. L'assenza di bifacciali elaborati e di punte diagnostiche è stata usata da alcuni critici come argomento contro l'interpretazione culturale, ma questo argomento rivela una circolarità: la cultura Clovis era definita esattamente dai bifacciali che mancano a Monte Verde, e usare l'assenza dei bifacciali Clovis come argomento contro la presenza umana equivale a definire la presenza umana in termini di cultura Clovis — cioè a begging the question.

La spiegazione alternativa — che i materiali litici locali (basalto e quarzarenite in prevalenza, non selce fine) non si prestano alla produzione di bifacciali sottili, e che le strategie di sussistenza documentate dal record faunistico e botanico non richiedevano una tecnologia litica elaborata — è ampiamente sufficiente. I manufatti di Monte Verde non somigliano a quelli Clovis perché non sono Clovis: sono la produzione litica di persone che avevano raggiunto il Cile meridionale attraverso un percorso di migliaia di anni, adattandosi a ambienti diversi da quelli delle Great Plains nordamericane e avendo sviluppato soluzioni tecnologiche diverse per problemi diversi.

I materiali botanici sono tra le evidenze più convincenti del sito: semi, frutti, foglie e radici di almeno 45 specie di piante, alcune delle quali non presenti nell'area oggi ma identificate come risorse alimentari nelle tradizioni etnobotaniche andine. La presenza di alghe marine — tra cui Gigartina, Sarcothalia e Porphyra — trasportate dal litorale pacifico che si trova a circa 90 km di distanza, documenta contatti con la costa e

l'utilizzo di risorse marine, e costituisce uno dei pochi indicatori disponibili sulla mobilità stagionale degli occupanti.

La frequenza e la diversità delle alghe marine nel deposito è stata analizzata da Dillehay e da Ramirez Aguilar (2020) come indicatore di un'economia che intrecciava risorse dell'entroterra e della costa in un sistema di mobilità regolare — non incompatibile con una colonizzazione recente della costa pacifica nordamericana come rotta di accesso al subcontinente americano.

Le piante medicinali conosciute nelle tradizioni andine — alcune identificate da frammenti masticati che conservano residui di enzimi salivari rilevabili con analisi immunoenzimatica — mostrano una conoscenza delle proprietà delle piante locali che non si accumula in pochi anni di frequentazione di un territorio, ma richiede generazioni di trasmissione culturale. Questo dato, per quanto difficile da quantificare, è coerente con una presenza umana nell'area del Cile meridionale sufficientemente consolidata da permettere la formazione di un corpus di conoscenza etnomedica locale.

2.2.3 La critica di Fiedel (1999) e la sua eredità metodologica

La pubblicazione della monografia di Dillehay su Monte Verde fu seguita nel 1999 da una critica insolita per quantità e specificità: Stuart Fiedel pubblicò su *Scientific American Discovering Archaeology* un articolo di 26 pagine che documentava 72 discrepanze tra il catalogo di scavo originale e il volume monografico pubblicato. Le discrepanze riguardavano coordinate di provenienza di alcuni manufatti, attribuzioni di strato, e descrizioni macroscopiche di singoli oggetti.

Guardando la critica con la distanza di venticinque anni, la sua struttura argomentativa rivela tanto sulle pratiche della comunità americana quanto sul merito delle questioni sollevate. Le discrepanze documentate da Fiedel erano reali — le discrepanze tra un database di scavo e la sua rielaborazione per la pubblicazione non sono rare in archeologia, specialmente in scavi complessi con molteplici campagne, supervisori diversi, e sistemi di classificazione che evolvono nel tempo — ma erano relative a manufatti litici di difficile identificazione, non alle strutture in legno, ai focolari, o ai materiali botanici che costituiscono il nucleo probante delle conclusioni del sito.

In termini di likelihood ratio (cfr. Capitolo V), le discrepanze di Fiedel riducevano marginalmente la LR relativa ai manufatti litici — che era già moderata, data la loro morfologia generica — senza toccare la LR associata alle strutture, ai focolari, e alle date, che era molto più alta. Il fatto che la critica si sia concentrata sul punto più debole

delle evidenze di Monte Verde — i manufatti litici — piuttosto che sulla sua armatura più solida suggerisce, nella migliore delle ipotesi, una selezione non casuale dei target dell'analisi critica.

La risposta di Dillehay fu pubblicata nel medesimo numero della rivista e confutò la grande maggioranza delle discrepanze come errori di lettura da parte di Fiedel, o come differenze sistematiche nella nomenclatura analitica tra il database di scavo e il volume monografico. Dillehay pubblicò nel 2008 un volume supplementare che includeva la documentazione primaria in forma completa, soddisfacendo la richiesta di trasparenza implicita nella critica. L'eredità metodologica più importante della controversia Fiedel-Dillehay non riguarda il merito delle posizioni: riguarda il livello di documentazione che la comunità può legittimamente richiedere a chi pubblica un sito straordinario, e la struttura istituzionale del processo di revisione critica.

Un sito come Monte Verde — che richiede la revisione di un paradigma decennale — deve essere documentato a un livello che permette la verifica indipendente non solo delle conclusioni ma dei dati primari: è questa la lezione metodologica positiva della controversia, indipendentemente dalla valutazione delle motivazioni di Fiedel o della qualità della risposta di Dillehay.

2.2.4 MV-I e il problema dell'evidenza più antica

Molto meno accettata è la componente MV-I, un livello più profondo separato da MV-II da un deposito sterile di limo argilloso. MV-I conteneva tre possibili focolari e oggetti che Dillehay descriveva come "possibili manufatti in pietra e legno", in associazione con carbone datato a ca. 33.000 anni cal BP. I problemi con MV-I sono molteplici e si rafforzano reciprocamente: la natura antropogenica degli "oggetti" è dubbia anche per alcuni collaboratori di Dillehay; le date su carbone in torbiera sono particolarmente vulnerabili alla contaminazione da carbonio fossile solubile; il livello sterile tra MV-I e MV-II non esclude il rimescolamento idrodinamico di materiale organico più antico verso l'alto attraverso movimenti del fluido interstiziale nella torbiera.

La scelta di Dillehay di presentare MV-I con cautela maggiore di MV-II è metodologicamente corretta, e il panel del 1997 si concentrò su MV-II senza pronunciarsi su MV-I. Per questo, MV-I è trattato come Classe C — possibile ma non dimostrato con gli standard epistemici attuali.

2.3 Paisley Caves, Oregon: il valore epistemico dei coproliti umani antichi

2.3.1 L'evidenza dei coproliti e il suo valore diagnostico

Le Paisley Caves sono un complesso di grotte nella contea di Lake, Oregon, esplorate da Dennis Jenkins a partire dal 2002. La rilevanza per il dibattito pre-Clovis dipende interamente dalla natura dei campioni datati: coproliti —

feci fossilizzate — identificati come umani attraverso l'analisi del DNA antico estratto da essi, con date ^{14}C AMS nell'intervallo 12.300–14.290 anni cal BP.

Il coprolite come proxy dell'attività umana ha una qualità epistemica che molte altre linee di evidenza non raggiungono, per una ragione strutturale precisa: è biologicamente prodotto dall'organismo a cui si attribuisce e rimane in posizione primaria nel luogo in cui è stato depositato. La separazione tra il "cosa ha prodotto il deposito" e "dove è stato trovato il deposito" — la disgiunzione che rende problematica l'interpretazione di quasi tutti gli altri tipi di materiale archeologico — è qui molto più ridotta. Un coprolite umano trovato in un riparo sotto roccia, in posizione stratigrafica primaria, con DNA umano autentico e data AMS concordante, è quasi impossibile da spiegare senza presenza umana nel sito nell'epoca della data.

Il DNA estratto dai coproliti di Paisley appartiene agli aplogruppi mitocondriali A2 e B2 — aplogruppi delle famiglie fondatrici delle popolazioni native americane, presenti anche in Asia orientale, assenti tra le popolazioni europee che costituiscono il pool principale di potenziali contaminanti moderni in un sito nordamericano. Jenkins e collaboratori (2008, *Science*) pubblicarono date AMS su otto coproliti nell'intervallo 12.300–14.290 anni cal BP, con il campione più antico a 14.290 ± 35 anni cal BP — circa 1.000 anni prima del Clovis più antico datato con certezza secondo Waters e Stafford (2007).

2.3.2 Il dibattito sulla contaminazione del DNA e la sua risoluzione

La critica di Poinar et al. (2009, *Science*) sollevava due preoccupazioni di diverso peso epistemico. La preoccupazione metodologica riguardava la suscettibilità del protocollo PCR convenzionale a amplificare DNA contaminante da organismi moderni che avevano toccato i coproliti durante lo scavo o la manipolazione di laboratorio. La preoccupazione interpretativa riguardava la possibilità che i coproliti appartenessero ad altri mammiferi e che il segnale umano fosse di contaminazione moderna.

La risposta di Jenkins fu risolutiva su entrambi i fronti. Per la preoccupazione metodologica, l'autenticazione del DNA antico attraverso il *damage pattern* — il pattern di errori di deamminazione delle citosine alle estremità delle sequenze, caratteristico del DNA antico degradato e assente nel DNA moderno contaminante — era presente nei campioni di Paisley e assente nei campioni di controllo. Questo test è specifico per il DNA antico: il DNA

moderno non mostra deamminazione perché non ha subito millenni di degradazione idrolitica. La rianalisi di Gilbert et al. (2008, *Science*) con sequenziamento di nuova generazione (NGS) — molto meno suscettibile di amplificare contaminanti moderni perché non usa primers specifici — confermò la presenza di DNA umano con damage pattern autentico.

Per la preoccupazione interpretativa, i coproliti contenevano semi di piante digestivamente elaborati, fibre di materiale vegetale, e struttura interna coerente con la fisiologia digestiva umana — velocità di transito intestinale, combinazione di specie vegetali e animali, dimensioni delle particelle — non compatibile con quella di altri grandi mammiferi del Pleistocene tardivo presenti nell'area. La diagnosi di specie attraverso il DNA è definitiva; la possibilità che contaminazione moderna abbia prodotto il segnale umano è esclusa dal damage pattern. Paisley Caves è ora saldamente in Classe A.

Ciò che rende Paisley particolarmente prezioso, oltre alla robustezza dell'evidenza, è la sua diversità tipologica rispetto a Monte Verde: laddove Monte Verde documenta strutture abitative, materiali botanici e focolari in un contesto di foresta temperata pluviale nel Cile meridionale, Paisley documenta presenza umana attraverso tracce biologiche dirette in un riparo sotto roccia in una zona semiarida dell'Oregon. Due siti indipendenti, di tipologia completamente diversa, in aree geografiche lontanissime, con linee di evidenza non sovrapponibili, che concordano su una presenza umana pre-Clovis: questa convergenza indipendente è l'indicatore più forte che sia disponibile.

2.4 Meadowcroft Rockshelter, Pennsylvania: il sito dimenticato

2.4.1 Cinquant'anni di dibattito irrisolto

Meadowcroft Rockshelter in Pennsylvania — scavato da James Adovasio a partire dal 1973 con una meticolosità che non ha precedenti nel record pre-Clovis nordamericano — occupa una posizione strana nella storia del dibattito: è il sito con la documentazione di scavo più completa e meglio pubblicata tra tutti i siti pre-Clovis rivendicati, e tuttavia non ha mai ottenuto il riconoscimento formale che la qualità della sua documentazione sembrerebbe meritare. Questa paradossalità non è un incidente: è il prodotto di una specifica configurazione delle forze epistemiche e istituzionali del campo americanista, e in quanto tale merita di essere analizzata non solo nei suoi contenuti tecnici ma nella sua struttura sociologica.

I livelli più profondi di Meadowcroft contenevano manufatti litici — una lama prismatica di chert e alcuni strumenti su scaglia — in associazione con date ^{14}C che si estendevano, nei campioni più antichi, fino a 16.000–19.000 anni BP non calibrati (circa 19.000–23.000 anni cal BP, a seconda della calibrazione usata). Le date erano su carbone di legna in eccellente stato di conservazione, da contesti stratigraficamente integri come documentato dalla micromorfologia e dall'analisi della distribuzione spaziale tridimensionale degli oggetti.

Adovasio condusse analisi paleoambientali sistematiche — polline, macroresti vegetali, fauna di insetti, molluschi — che mostravano, nei livelli pre-Clovis, una fauna temperata fredda compatibile con le condizioni del Tardo Pleistocene, non con il Olocene recente — un'evidenza paleoambientale indipendente della congruenza tra gli indicatori climatici e le date radiocarboniche.

L'obiezione principale di Haynes e Mead (1975) e di Haynes (1980) riguardava la possibilità di contaminazione dei campioni di carbone da carbonio fossile. L'area della Pennsylvania sudoccidentale dove si trova Meadowcroft è situata al margine del bacino carbonifero appalachiano, e l'acqua di falda che percolava nel sito attraverso le fratture nella roccia calcarea sovrastante era potenzialmente ricca di carbonio di carbone fossile dissolto — il che avrebbe introdotto nel sistema una frazione di carbonio ^{14}C-dead e quindi abbassato artificialmente le date misurate. L'obiezione era tecnicamente plausibile: l'effetto del carbonio fossile dissolto nelle acque di falda è un problema reale e documentato in altri siti.

La risposta di Adovasio fu sistematica e documentata. Misurazioni chimiche dell'acqua di falda nel sito mostravano contenuti di carbonio organico dissolto molto bassi — insufficienti a produrre il livello di abbassamento delle date necessario per spiegare la discrepanza rispetto al paradigma Clovis First. Le date sui macroresti di piante annuali — la cui brevissima vita biologica esclude l'accumulo di carbonio vecchio nei tessuti — erano concordanti con le date sul carbone, suggerendo che non ci fosse un offset sistematico attribuibile a carbonio fossile.

L'analisi floristica e faunistica dei livelli datati mostrava specie coerenti con condizioni del Tardo Pleistocene, escludendo la possibilità che i materiali datati fossero in posizione secondaria rispetto a depositi più recenti. Nessuno di questi argomenti confutò definitivamente l'obiezione del carbonio fossile — la questione è genuinamente difficile da risolvere con certezza assoluta — ma l'insieme delle risposte ridusse la probabilità dell'obiezione a un livello che, se applicato con simmetria a qualsiasi altro sito preistorico, avrebbe richiesto la revisione di un gran numero di date accettate nella letteratura americana.

Meadowcroft rimane in Classe B non perché le sue evidenze siano deboli, ma perché il tipo specifico di incertezza residua — la non-escludibilità assoluta della contaminazione da carbonio fossile — è difficile da eliminare con la tecnologia disponibile. Un esperimento decisivo sarebbe la datazione di macroresti botanici di piante annuali con AMS di terza generazione applicando il protocollo di compound-specific dating (datazione di singole molecole organiche, come i biomarkers lipidici, estratte per cromatografia gas-liquido prima della datazione AMS) — un protocollo disponibile in pochissimi laboratori al mondo, non ancora applicato sistematicamente a Meadowcroft.

2.5 Chiquihuite Cave, Messico: la profondità temporale contestata

2.5.1 Il sito e la struttura delle rivendicazioni

Chiquihuite Cave si trova a 2.740 m di quota sulle montagne Astillero dello Stato di Zacatecas, Messico centrale, in una zona di difficile accesso identificata da Ciprian Ardelean. Il sito è una grotta calcarea con un corridoio principale di circa 200 m², parte del cui riempimento è stato scavato tra il 2016 e il 2019. I risultati furono pubblicati nel 2020 su *Nature* con la controversia simultanea su *Nature* di Becerra-Valdivia e Higham, che forniva un contesto più ampio. Le rivendicazioni di Ardelean et al. sono cronologicamente le più audaci tra i siti di Classe B: quasi 2.000 pezzi litici distribuiti in livelli stratigrafici datati da ^{14}C e OSL nell'intervallo 19.000–33.000 anni cal BP, con i livelli più antichi che cadono nel pieno dell'Ultimo Massimo Glaciale.

Se accettate, queste date creano un problema stratigrafico-geografico che non può essere facilmente ignorato: collocano esseri umani in Messico centrale durante il periodo in cui il modello beringiano tradizionale considera il corridoio ice-free chiuso o appena cominciato ad aprirsi. L'unica soluzione coerente è la rotta costiera del Pacifico con inizio della colonizzazione precedente al LGM — esattamente il modello che i dati genetici del "Beringian Standstill" suggeriscono indipendentemente.

2.5.2 La natura dei manufatti: il nodo centrale del dibattito

La critica principale alle rivendicazioni di Chiquihuite riguarda non le date — la concordanza tra ^{14}C e OSL è considerata soddisfacente dalla maggioranza degli osservatori — ma la natura antropogenica dei "manufatti". I pezzi litici di Chiquihuite sono quasi tutti piccoli (meno di 3 cm), non diagnostici, e prodotti su calcare cristallino

ricco di vene di silice secondaria — una materia prima che si sfalda naturalmente in scaglie di forma vagamente concoidale per processi di crioclastismo e di spallazione termica.

Beckett et al. (2021, PaleoAmerica) sottolineano che nessuno dei "manufatti" di Chiquihuite mostra caratteristiche morfologiche diagnostiche di lavorazione intenzionale al di là del dubbio ragionevole; che la materia prima produce naturalmente schegge simili a quelle di percussione; e che le frequenze di "manufatti" nei livelli più profondi non mostrano la progressiva intensificazione attesa da un'occupazione umana prolungata.

Ardelean risponde che la valutazione degli oggetti è stata effettuata da tecnici litici con esperienza in industrie del Paleolitico superiore messicano, e che il pattern di distribuzione spaziale degli oggetti — concentrati in zone specifiche della grotta compatibili con aree di attività — non è compatibile con una distribuzione casuale di prodotti di crollo. La risoluzione del dibattito richiede la pubblicazione di analisi traceologiche ad alta risoluzione (SEM, AFM) sulle superfici attive degli oggetti più diagnostici, e la conduzione di esperimenti di replica su calcare locale per caratterizzare la morfologia dei prodotti di scheggiatura naturale da questo specifico litotipo. Fino ad allora, il dibattito non può essere chiuso in modo soddisfacente.

La scoperta ha tuttavia un valore importante indipendente dalla sua risoluzione definitiva: ha forzato la comunità a prendere sul serio il modello della colonizzazione pre-LGM in modo più esplicito di quanto non fosse stato fatto dopo Monte Verde, e ha contribuito direttamente all'analisi bayesiana di Becerra-Valdivia e Higham che costituisce la sintesi quantitativa più ambiziosa disponibile sulle date di colonizzazione.

2.6 Bluefish Caves, Canada: l'obliterazione e il recupero di un'evidenza

2.6.1 Storia dell'oblio e ragioni istituzionali

Bluefish Caves è un complesso di tre grotte nel territorio dello Yukon (67°N), vicino al fiume Bluefish, scoperto e scavato da Jacques Cinq-Mars dell'Archaeological Survey of Canada tra il 1977 e il 1987. I risultati degli scavi furono pubblicati in rapporti tecnici dell'Archaeological Survey e in alcuni articoli di Cinq-Mars, ma mai in una monografia sistematica — una lacuna che contribuì in modo determinante all'oscuramento del sito nel dibattito americanista. La mancata pubblicazione monografica non era accidentale: Cinq-Mars, che era un ricercatore governativo senza la base istituzionale universitaria che avrebbe garantito la visibilità accademica dei suoi risultati, incontrò resistenze

editoriali documentabili ogni volta che tentò di pubblicare le sue rivendicazioni nelle riviste principali del campo.

L'oblio istituzionale di Bluefish Caves per quasi vent'anni è uno dei casi più istruttivi di come la struttura dell'accademia americanista gestì i dati pre-Clovis scomodi: non attraverso la confutazione — nessun paper sostanziale mise in discussione le evidenze di Cinq-Mars sulla base dei dati, perché i dati non erano sufficientemente accessibili per essere criticati — ma attraverso l'ignoranza organizzata. Il caso di Cinq-Mars, come quello di Guidon per Pedra Furada (v. infra), mostra che il paradigma Clovis First non era difeso solo con argomenti scientifici: era difeso anche attraverso il controllo dell'accesso ai canali di pubblicazione e alle reti di citazione che determinano la visibilità di una scoperta nella letteratura del campo.

2.6.2 Il riesame di Bourgeon, Burke e Higham (2017) e le sue implicazioni

Il riesame sistematico delle ossa di Bluefish Caves fu condotto da Lauriane Bourgeon, Ariane Burke e Thomas Higham, con risultati pubblicati su PLOS ONE nel 2017. Bourgeon et al. esaminarono con stereomicroscopia a 10–50× un sottocampione di ossa con numero di catalogo tracciabile, confrontando le morfologie osservate con un corpus di riferimento di cut-marks sperimentali prodotti con strumenti di selce su ossa fresche di grandi mammiferi e con un corpus di riferimento di marcature prodotte da carnivori (cani, volpi, ghepardi) documentate sperimentalmente da Blumenschine e Selvaggio (1988) e Binford (1981).

Il risultato fu che 15 elementi ossei mostravano striature con caratteristiche morfologiche diagnostiche di marcatura da strumento litico: bordi netti in sezione trasversale (V-profile), disposizione parallela coerente con un singolo movimento di taglio, orientamento congruente con movimenti di defleshing o di smidollatura, e assenza del caratteristico profilo a U con banding striato prodotto dai denti di carnivori. Le ossa con marcature includevano elementi di cavallo (Equus sp.) e di mammut lanoso (Mammuthus primigenius) con date ^{14}C nell'intervallo 19.650–23.930 anni cal BP.

Le implicazioni geografiche di questo risultato per il modello beringiano sono dirette: Bluefish Caves è situata nello Yukon, all'interno dell'area della Beringia orientale, in una posizione compatibile con il "Beringian Standstill" genetico discusso nel Capitolo IV. La presenza umana nelle grotte del Bluefish nello stesso intervallo temporale in cui la genetica stima il periodo di isolamento beringiano non è una coincidenza da ignorare: è esattamente la corroborazione archeologi che il modello del

Beringian Standstill predice e che non era mai stata trovata prima del riesame di Bourgeon.

Il fatto che questa corroborazione fosse nella documentazione di Cinq-Mars dagli anni Ottanta ma non fosse stata riconosciuta — per mancanza di analisi traceologica rigorosa, per mancanza di pubblicazione sistematica, e per resistenza istituzionale — è la misura più precisa del costo epistemico del conservatorismo paradigmatico.

2.7 Pedra Furada, Brasile: il caso più controverso e le sue lezioni metodologiche

2.7.1 Un sito straordinario in un dibattito strutturalmente squilibrato

Pedra Furada è un sito rupestre nello stato di Piauí, Brasile nordorientale, scavato da Niède Guidon a partire dal 1978. Il sito è un grande abri sous roche con una sequenza stratigrafica continua che, secondo Guidon e collaboratori, copre gli ultimi 48.000 anni. Guidon è una figura complessa nella storia del dibattito pre-Clovis: ricercatrice di formazione europea (ha lavorato principalmente all'École des Hautes Études en Sciences Sociales di Parigi), ha operato ai margini del mainstream americanista anglosassone, pubblicando principalmente in francese e portoghese — il che ha ridotto la visibilità del suo lavoro nella letteratura anglofona che domina il campo.

Questa posizione periferica non è irrilevante per la valutazione delle sue rivendicazioni: da un lato ha ridotto la pressione a conformarsi agli standard metodologici del mainstream americanista; dall'altro ha anche ridotto la possibilità di una critica costruttiva interna che avrebbe potuto rafforzare le parti più deboli della documentazione.

Le rivendicazioni di Guidon sono le più straordinarie del dibattito pre-Clovis non classificabili come classe D: una presenza umana continuativa dalla zona centrale del Brasile nordorientale per 48.000 anni, con date ai livelli più profondi (Pedra Furada I, II, III) nell'intervallo 47.000–48.000 BP non calibrati — al limite e al di là della risoluzione del metodo ^{14}C.

2.7.2 Le due famiglie di obiezioni e la loro forza differenziale

Il panel critico del 1993, composto da undici archeologi nordamericani ed europei, produsse due famiglie di obiezioni che hanno strutture logiche molto diverse e che meritano di essere trattate separatamente.

La prima famiglia — l'obiezione dei geofatti — si basa su osservazioni concrete sul contesto geologico del sito. L'area esterna all'abri è un boulder field dove ciottoli di quartzite rotolano periodicamente dalla parete rocciosa sovrastante, e l'impatto di ciottoli su substrato duro produce schegge concoidali morfologicamente simili a quelle

di percussione intenzionale. Il test più diretto per distinguere manufatti da geofatti in questo contesto — la comparazione sistematica della frequenza e della morfologia delle schegge inside e outside l'abri — fu condotto da Meltzer et al. (1994) con il risultato che le frequenze erano paragonabili, il che è inconsistente con la produzione intenzionale (che dovrebbe concentrare le schegge nelle aree di lavoro all'interno dell'abri).

Guidon rispose con l'analisi morfometrica sistematica delle "schegge" dei livelli antichi, documentando frequenze di coni di Hertz più alte di quanto atteso in un campione di schegge di crollo naturale. Questo dibattito non è concluso, e richiederebbe la conduziione di esperimenti di replica controllati con la stessa materia prima nelle stesse condizioni ambientali — un programma di ricerca mai realizzato.

La seconda famiglia — l'obiezione dei carboni naturali — si basa sulla frequenza degli incendi naturali nella caatinga. Gli incendi naturali nella caatinga brasiliana erano e sono frequentissimi — la caatinga è un ecosistema adattato al fuoco con cicli di bruciatura di 3–7 anni — e il carbone prodotto dagli incendi naturali può infiltrarsi nei depositi sottostanti attraverso bioturbazione o movimento idrodinamico. Il test più diretto per distinguere carbone di incendi naturali da carbone di focolari antropici è la morfologia dei frammenti (i carbone di focolare tende ad avere morfologie di combustione controllata a bassa temperatura, distinte da quelle di combustione selvaggia ad alta temperatura) e la configurazione spaziale (i carbone di focolare tende a essere concentrato in spot di dimensioni limitate con distribuzione centripeta, non disperso uniformemente nel deposito).

Le analisi di Guidon su questi criteri sono state contestate dai critici per il metodo di campionamento — ma non confutate su basi di dati pubblici comparabili.

Il problema fondamentale con Pedra Furada nei livelli oltre 40.000 anni è, in ultima analisi, metodologicamente parzialmente insormontabile con la tecnologia standard: siamo al limite superiore del ^{14}C, dove la probabilità di un'età finita artificialmente abbassata dalla contaminazione moderna è non trascurabile anche con i migliori protocolli disponibili. Alcune date OSL condotte da Mercier et al. (2013) sui sedimenti associati ai livelli più antichi producono risultati nell'intervallo 50.000–100.000 anni, concordanti con le date ^{14}C per i livelli intermedi ma molto più antichi dei livelli più profondi — una discordanza che è compatibile sia con la correttezza delle date OSL (e con l'abbassamento delle date ^{14}C da contaminazione) sia con problemi nel bleaching dell'OSL.

Pedra Furada nei livelli profondi rimane il sito più impegnativo del dibattito pre-Clovis per una ragione che trascende il merito delle sue specifiche evidenze: è il sito dove le due famiglie di resistenza al pre-Clovis — quella

metodologicamente fondata e quella istituzionalmente motivata — sono più difficili da distinguere. La valutazione equa delle evidenze di Pedra Furada richiederebbe un reinvestimento completo nel sito con protocolli aggiornati di analisi dei sedimenti, datazione OSL con SAR e protocollo di test a singolo grano, e analisi AMS con spettrometri di terza generazione su macroresti vegetali identificati botanicamente. Questo investimento non è mai stato fatto — e la mancanza di questo investimento è essa stessa un dato sociologicamente significativo.

2.8 Cerutti Mastodon, California: il valore epistemico di un caso limite

2.8.1 Le rivendicazioni di Deméré et al. (2017) e la loro reception

Nel 2017, Thomas Deméré e collaboratori del San Diego Natural History Museum pubblicarono su *Nature* la descrizione di resti scheletrici di un mastodonte (*Mammut americanum*) in associazione con pietre e ossa rotte in modo che documenterebbe, secondo gli autori, attività di macellazione e smidollatura da parte di ominini. La datazione: ca. 130.700 anni BP con U-series/ESR sullo smalto dentale del mastodonte.

La reception fu di scetticismo quasi universale, e per buone ragioni. Le ossa mostrano pattern di rottura a spirale — spiral fracture — interpretate dagli autori come smidollatura intenzionale, ma la spiral fracture può essere prodotta da una varietà di cause non umane: calpestamento da parte di grandi mammiferi su ossa fresche, compressione geostatica, retrazione differenziale durante l'asciugatura. Le "pietre usate come incudini" non mostrano marcature microscopiche di percussione intensiva (microscarring, impacting points) che ci si aspetterebbe da un uso prolungato.

L'assenza di qualsiasi altro indicatore di ominini — manufatti litici chiaramente lavorati, focolari, resti botanici elaborati — nella stessa fascia temporale in qualsiasi sito delle Americhe o dell'Asia orientale adiacente è un argomento pesante, non semplicemente dall'assenza di evidenza, ma dalla mancanza di un contesto biologicamente e geograficamente plausibile.

2.8.2 Il valore del caso come test dei criteri di accettazione

Il caso Cerutti Mastodon ha però un valore didattico che trascende il giudizio sulle specifiche evidenze. Mostra con chiarezza come la struttura formale dell'argomento per un sito eccezionale — una data, un'associazione spaziale tra ossa e pietre, un'interpretazione delle morfologie — può essere costruttivamente identica per siti di qualità evidenziale molto diversa: la struttura del paper di Deméré et al. su Nature è

formalmente analoga alla struttura del paper di Dillehay su Monte Verde, ma la forza delle evidenze è profondamente diversa.

Questo mostra che la valutazione della forza di un'evidenza non può essere fatta sulla sola struttura formale dell'argomento, ma richiede il giudizio sostanziale sul contenuto empirico di ogni elemento del ragionamento — e questo giudizio, a sua volta, richiede la familiarità con la letteratura tecnica specifica di ogni sotto-disciplina coinvolta (tafonomia ossea, traceologia litica, geochimica del U/Th, OSL) che nessun singolo reviewers può possedere integralmente. Il problema della specializzazione frammentata — inevitabile in un campo che richiede competenze in geologia, botanica, genetica, fisica nucleare, e archeologia nello stesso paper — è uno dei fattori strutturali che rendono il peer review dei siti pre-Clovis eccezionali cronicamente inadeguato.

Siti mancanti: Cooper's Ferry, Topper, Patagonia, Madjedbebe e i livelli intermedi di Pedra Furada

2.9 Cooper's Ferry, Idaho: il sito nordamericano più antico con stratigrafia integra

2.9.1 Contesto e scoperta

Cooper's Ferry si trova lungo il fiume Salmon nella Snake River Plain dell'Idaho occidentale, a circa 60 km a est della confluenza del Salmon con il Snake River, in una posizione geografica che assume un significato strategico nel dibattito sul percorso del primo popolamento nordamericano. Il sito fu riconosciuto da Loren Davis negli anni 1990 e scavato sistematicamente tra il 1997 e il 2019, con i risultati più significativi pubblicati su *Science* nel 2019 (Davis et al., "Late Upper Paleolithic occupation at Cooper's Ferry, Idaho, USA, ~16,000 years ago"). È attualmente il sito nordamericano — non sudamericano, non cileno, non brasiliano — con la documentazione stratigrafica più solida per date nell'intervallo 16.000 cal BP, e questa collocazione geografica gli conferisce un peso epistemico del tutto particolare: si trova nel cuore del territorio in cui il paradigma Clovis First predice l'assenza di esseri umani per almeno altri 2.000–3.000 anni.

Il sito è un deposito stratificato all'aperto in una terrazza alluvionale del fiume Salmon, protetto da un overhanging di roccia arenaria che ha contribuito alla preservazione dei depositi superiori. La stratigrafia è articolata in sette unità deposizionali distinte, definite dalla granulometria dei sedimenti e dal loro contenuto organico, che coprono un arco temporale dall'Olocene medio fino al Tardo Pleistocene. Le unità più profonde — la Unità IV e la sottostante Unità V — hanno prodotto manufatti litici e resti faunistici in associazione con date che sfidano il paradigma Clovis First in modo frontale.

2.9.2 Le evidenze e la loro qualità stratigrafica

Le date AMS ottenute da Davis et al. su carbone di legna (*single entity*, frammenti identificati botanicamente) e su osso bruciato dalla Unità IV coprono l'intervallo 15.280–16.560 cal BP (2σ, calibrate con IntCal20), con la mediana della distribuzione a ca. 15.890 cal BP. Tre aspetti rendono questa cronologia particolarmente robusta rispetto ai siti di analoga antichità. Il primo è la replicazione: Davis et al. pubblicano undici date AMS da cinque diversi livelli sub-unitari della Unità IV, concordanti entro i limiti degli errori analitici attesi per campioni di carbone di legna in depositi non perturbati — la concordanza tra date da livelli fisicamente separati è il test più diretto contro la contaminazione sistematica. Il secondo è il pretrattamento: tutti i campioni sono stati sottoposti al protocollo ABA esteso con doppio trattamento alcalino, e i valori $\delta^{13}C$ pubblicati cadono nell'intervallo atteso per legno di conifera dell'area — escludendo le principali fonti di contaminazione da materiale isotopicamente anomalo. Il terzo è la micromorfologia: l'analisi delle sezioni sottili dei sedimenti della Unità IV non mostra evidenze di bioturbazione, di crioturbazione, o di rimescolamento idrodinamico che potrebbero aver alterato la posizione originale dei manufatti rispetto al materiale datato.

I manufatti dell'Unità IV appartengono prevalentemente alla categoria dei manufatti su lama e su scheggia senza morfologie diagnostiche di riduzione bifacciale: lame prismatiche, raschiatoi laterali, grattatoi frontali su scaglia. L'assenza di punte bifacciali e di manufatti diagnosticamente Clovis era attesa e non sorprende; quello che sorprende, e che ha attirato l'attenzione immediata della comunità, è la presenza di morfologie — in particolare le lame prismatiche e il metodo di riduzione su nucleo — che mostrano somiglianze con le industrie della tradizione microlamellare siberiana (cultura di Dyuktai, siti di Ushki I e II), non con le industrie del Paleolitico superiore dell'Asia nordorientale che sono il presunto antenato di Clovis attraverso la tradizione di Nenana. Davis e collaboratori interpretano queste somiglianze come evidenza che la prima colonizzazione del Nordamerica fu condotta da gruppi portatori di una tecnologia microlamellare di tipo siberiano orientale — non da un progenitore diretto di Clovis — e che la tecnologia Clovis si sviluppò in modo indipendente nelle Americhe da questa base tecnologica più antica, attraverso un processo di trasformazione interna che richiederebbe un intervallo temporale di almeno 1.500–2.000 anni.

2.9.3 Implicazioni geografiche: il fiume Salmon come corridoio di penetrazione

La posizione di Cooper's Ferry lungo il fiume Salmon è geograficamente cruciale per il modello della rotta costiera del Pacifico. Il fiume Salmon scorre verso est-nordest per circa 400 km dall'area del Salmon River Mountains prima di confluire nel Snake, e la

Snake River Plain fornisce una naturale via di penetrazione dall'interno verso est, connettendo la costa del Pacifico con le Great Basin e il Plateau nordoccidentale attraverso una serie di valli fluviali interconnesse. Se i primi colonizzatori raggiunsero la costa della British Columbia e del Washington ca. 17.000–16.000 anni cal BP, è precisamente lungo questi corridoi fluviali che ci si aspetterebbe trovare i loro siti di penetrazione verso l'interno — e Cooper's Ferry si trova esattamente in quella posizione.

La modellizzazione GIS del percorso più probabile dalla costa verso Cooper's Ferry, condotta da Davis et al. utilizzando dati di elevazione e di vegetazione paleolitica ricostruita, mostra che la distanza percorribile seguendo le valli fluviali senza dover attraversare terreni ad alta quota è di circa 450–550 km — compatibile con un tasso di penetrazione di pochi chilometri all'anno per un gruppo con mobilità stagionale, e con un tempo di colonizzazione dell'area del Salmon di ca. 500–800 anni a partire dall'approdo costiero iniziale. Questo calcolo è coerente con una colonizzazione costiera iniziata ca. 16.500–17.000 anni cal BP: un timing che si sovrappone all'intervallo superiore della stima di apertura della piattaforma costiera dalla glaciazione Cordillerana.

Il confronto con Monte Verde è illuminante: se Cooper's Ferry data a ca. 15.890 cal BP e Monte Verde data a ca. 14.600 cal BP, la differenza di ca. 1.300 anni deve essere spiegata come il tempo necessario a percorrere ca. 15.000 km di distanza lineare dal northwest nordamericano all'estremo meridionale del Cile — corrispondente a un tasso di avanzamento verso sud di ca. 11,5 km/anno. Questo è un valore biologicamente plausibile, molto inferiore ai 16 km/anno del modello di Martin ma superiore ai valori minimi sostenibili per gruppi a bassa mobilità: indica una colonizzazione diretta verso sud, probabilmente lungo la costa del Pacifico con una velocità analoga a quella stimata per la colonizzazione della costa australiana ca. 65.000 anni fa.

2.10 Topper, South Carolina: un sito di Classe C con valore metodologico

2.10.1 Il sito e la struttura delle rivendicazioni

Topper è un sito di estrazione della selce nella contea di Allendale, South Carolina, scavato da Albert Goodyear dell'University of South Carolina a partire dal 1998. Goodyear condusse scavi verticali al di sotto del livello Clovis documentato negli strati superiori, trovando un continuum stratigrafico verso il basso con oggetti litici che, nella sua interpretazione, diventavano progressivamente più antichi. Le date OSL sui sedimenti associati ai livelli pre-Clovis profondi producevano valori nell'intervallo 50.000 anni — suscitando grande clamore mediatico al momento della pubblicazione dei risultati preliminari nel 2004.

La valutazione critica di Topper rende questo sito un esempio paradigmatico della difficoltà di distinguere manufatti da geofatti in contesti di estrazione litica. L'area è una cava di chert quaternario fluviale, con ciottoli di chert di alta qualità esposti naturalmente nel profilo alluviale. In un contesto di cava naturale, la probabilità che i processi idrodinamici e i movimenti gravitazionali producano schegge con morfologie concoidali è molto alta — significativamente più alta di quanto non accada in un sito di insediamento o di caccia lontano dalle esposizioni naturali di chert. I "manufatti" dei livelli profondi di Topper hanno dimensioni molto piccole (la maggioranza sotto i 2 cm) e non mostrano pattern di riduzione sistematica riconoscibili; l'analisi traceologica pubblicata da Waters et al. (2009) non identificò tracce d'uso diagnostiche su nessuno degli oggetti del livello pre-Clovis profondo.

2.10.2 Il valore metodologico negativo di Topper

Topper è tuttavia un sito di grande valore metodologico negativo: rappresenta il caso esemplare di come una combinazione di fattori favorevoli — entusiasmo del ricercatore, clamore mediatico, difficoltà di accesso al sito per critici indipendenti, e un'evidenza formalmente non falsificata ma improbabile — possa mantenere un sito nella discussione accademica per decenni senza che né l'accettazione né il rifiuto definitivi siano raggiungibili con i dati disponibili. La difficoltà di chiudere il caso Topper è una dimostrazione empirica della necessità di criteri di accettazione espliciti e simmetrici, applicati prima della pubblicazione piuttosto che dopo: se i criteri fossero stati applicati ex ante con la stessa severità richiesta a posteriori, la rivendicazione di 50.000 anni sarebbe rimasta nel cassetto dei dati preliminari anziché generare un ciclo di pubblicazioni e repliche costoso e non risolutivo.

2.11 I siti della Patagonia e della Terra del Fuoco: il limite meridionale della dispersione

2.11.1 Los Toldos, Fell's Cave e il problema del confine meridionale

Il record pre-Clovis del Sudamerica meridionale è dominato da una manciata di siti chiave nella Patagonia argentina e cilena e nella Terra del Fuoco, che forniscono i dati più meridionali disponibili sulla prima colonizzazione umana e permettono di stimare il tasso di avanzamento verso sud del fronte di colonizzazione con una precisione non ottenibile altrove.

Fell's Cave nella Patagonia cilena — scavata originariamente da Junius Bird nel 1936 e poi rianalizzata con date AMS da Nami e Nakamura (1995) — ha prodotto date per le punte a coda di pesce (*Fishtail points*, o *Fell's Cave projectile points*) nell'intervallo 11.000–10.500 cal BP: significativamente più recenti di Clovis, ma con una morfologia così simile alle punte Clovis da aver alimentato per anni il dibattito se le punte Fishtail

fossero derivate da Clovis attraverso un processo di diffusione rapida verso sud o se rappresentassero una convergenza morfologica indipendente. Il confronto metrico sistematico condotto da Waters e Stafford (2014) e da Erlandson et al. (2016) mostra che le dimensioni delle punte Fishtail sono statisticamente distinte dalle punte Clovis — più piccole e con proporzioni diverse — il che è più coerente con la convergenza indipendente che con la discendenza diretta. Se questa interpretazione è corretta, la tecnologia bifacciale con punta scanalata si sviluppò in modo analogo in Nord e Sud America da basi tecnologiche distinte, probabilmente in risposta alle stesse pressioni selettive dell'ambiente della megafauna pleistocenica — una convergenza adattativa che ha precisi paralleli nella biologia evolutiva (la forma aerodinamica del delfino e dello squalo, per esempio, o la struttura dell'occhio nei cefalopodi e nei vertebrati).

Los Toldos, nella provincia di Santa Cruz in Argentina, ha prodotto date per i livelli più profondi (Strato 11) nell'intervallo 12.600 cal BP su carbone in associazione con industria litica su scaglia non bifacciale — più recente di Monte Verde, ma con una distribuzione geografica più continentale che costiera. La combinazione di Los Toldos con Monte Verde suggerisce che la colonizzazione del Sudamerica meridionale avvenne attraverso percorsi multipli convergenti: uno costiero (documentato da Monte Verde) e uno di penetrazione interna lungo i corridoi andini e della Patagonia settentrionale.

Il sito di Cueva de las Manos, nella stessa area geografica di Los Toldos, ha arte rupestre datata almeno a 9.000 anni cal BP, con alcune interpretazioni che la spingono fino a 13.000 anni: un documento straordinario di presenza umana consolidata nell'area, con evidenze di struttura simbolica complessa (la mano in negativo come firma di presenza, con variazioni sistematiche nel colore e nella disposizione che indicano tradizioni culturali differenziate) che non si accumula in pochi anni ma richiede generazioni di frequentazione dello stesso luogo.

2.11.2 La Terra del Fuoco e il limite meridionale assoluto

La Terra del Fuoco è il punto più meridionale della colonizzazione pleistocenica documentata. Il sito di Tres Arroyos 1 nella Terra del Fuoco cilena ha prodotto date nell'intervallo 10.500–11.000 cal BP per i livelli più antichi con manufatti litici — coerenti con una colonizzazione del continente americano iniziata non più tardi di 15.000–16.000 anni cal BP, se si stima un tasso di avanzamento verso sud di ca. 10–15 km/anno dall'area di Cooper's Ferry o della British Columbia fino all'estremo meridionale del continente. Questa stima di tasso, calibrata sui dati di Cooper's Ferry e Monte Verde come già argomentato nella sezione 2.9.3, è coerente con tutti i siti sudamericani con date affidabili: nessun sito con date più antiche di Monte Verde (14.600 cal BP) si trova a latitudini più meridionali, e nessun sito con date tra Monte

Verde e Fell's Cave si trova a latitudini che violino la sequenza geografica attesa per una colonizzazione con fronte di avanzamento verso sud.

Questa coerenza geografico-cronologica — spesso non discussa in modo sistematico nella letteratura che tratta i siti uno per uno — è di per sé un'evidenza forte per la colonizzazione costiera pre-Clovis: non nel senso che la dimostra definitivamente, ma nel senso che la rende la spiegazione più parsimoniosa dell'insieme dei dati disponibili, senza richiedere né colonizzazioni multiple né rotte alternative non documentate.

2.12 Il benchmark australiano: Madjedbebe e le implicazioni comparative

2.12.1 Madjedbebe come termine di paragone metodologico

Madjedbebe (precedentemente noto come Malakunanja II) è un sito rupestre nel Territorio del Nord australiano, scavato nel 1989 da Rhys Jones e nel 2012 e 2015 da Chris Clarkson. La pubblicazione dei risultati del riscavo su *Nature* nel 2017 (Clarkson et al., "Human occupation of northern Australia by 65,000 years ago") ha stabilito che gli esseri umani erano presenti nell'area almeno 65.000 anni fa, sulla base di date OSL con protocollo SAR a singolo grano su quarzo estratto da sedimenti in associazione stratigrafica diretta con manufatti litici.

La rilevanza di Madjedbebe per il dibattito pre-Clovis americano non è di contenuto — non riguarda le Americhe — ma di struttura metodologica e di plausibilità comparativa. Madjedbebe dimostra tre cose che hanno implicazioni dirette per il dibattito americano. La prima è che esseri umani anatomicamente moderni erano capaci di attraversare distanze marittime significative almeno 65.000 anni fa: il canale di Torres tra la Nuova Guinea e l'Australia era ridotto durante il LGM, ma non eliminato, e richiedeva comunque una traversata di almeno 70 km su acque aperte — una distanza che supera qualsiasi attraversamento marittimo richiesto dalla rotta costiera del Pacifico nordamericano (dove le isole della corrente Alexander Archipelago riducono la traversata più lunga a meno di 50 km in quasi tutto il percorso). La seconda è che la colonizzazione di un nuovo continente da parte di una piccola popolazione fondatrice può lasciare un segnale nel record archeologi che è rilevabile con metodologie adeguate anche a distanza di 65.000 anni — il che confuta l'argomento che una colonizzazione pre-Clovis delle Americhe sarebbe per definizione non rilevabile. La terza è che il modello OSL a singolo grano, combinato con il protocollo SAR, è uno strumento sufficientemente potente da produrre date affidabili su scale temporali molto più lunghe di quelle rilevanti per il pre-Clovis americano — eliminando la necessità di invocare l'impossibilità metodologica della datazione per escludere scenari cronologici disturbanti.

2.12.2 La struttura comparativa dell'argomento australiano

L'argomento australiano ha una struttura logica precisa nel contesto del dibattito pre-Clovis. Se gli esseri umani attraversarono 70 km di oceano aperto 65.000 anni fa per colonizzare l'Australia, è difficile sostenere che fossero incapaci di navigazione costiera lungo la riva del Pacifico nordamericano 50.000 anni più tardi — quando la tecnologia umana era certamente più avanzata, le rotte costiere erano più protette e meno esposte a venti aperti, e le risorse marine della kelp forest erano più abbondanti di quelle delle acque tropicali che circondano l'Australia settentrionale. Questo argomento non prova che la colonizzazione pre-Clovis avvenne; prova che il limite inferito dalla plausibilità tecnologica è molto più antico di quanto il paradigma Clovis First assumesse. La barriera tecnologica non è un argomento disponibile contro la colonizzazione pre-Clovis: chi la invocava non disponeva di Madjedbebe come benchmark, e chi la invoca oggi lo fa in contraddizione con le evidenze disponibili.

La colonizzazione dell'Australia è anche rilevante come modello demografico: studi di genetica delle popolazioni aborigene australiane (Tobler et al. 2017; Malaspinas et al. 2016) mostrano che la colonizzazione fu condotta da una singola popolazione fondatrice di piccole dimensioni (stima della dimensione effettiva fondatrice: 1.000–10.000 individui) che si espanse rapidamente nell'intero continente nell'arco di ca. 2.000–5.000 anni — un processo demografico quasi identico a quello postulato dal modello del Beringian Standstill per le Americhe, con tempi analoghi e dimensioni fondatrici comparabili. La convergenza dei due modelli demografici su scala planetaria — stessa struttura, stessi ordini di grandezza — non è sorprendente: è il prodotto delle stesse leggi della demografia delle popolazioni che governano qualsiasi espansione in un territorio non precedentemente occupato.

2.13 I livelli intermedi di Pedra Furada: la finestra 25.000–40.000 BP

2.13.1 Perché i livelli intermedi meritano trattazione separata dai livelli profondi

La discussione di Pedra Furada nella sezione 2.7 si è concentrata sui livelli più antichi (oltre 40.000 BP) e sulla questione dei geofatti. È necessario ora affrontare separatamente i livelli dell'intervallo 25.000–40.000 anni, che presentano una configurazione evidenziale significativamente diversa: le date sono all'interno della finestra di affidabilità del ^{14}C (sebbene al suo limite superiore), e gli oggetti sono in media morfologicamente più elaborati e più difficilmente spiegabili come prodotti di processi naturali.

I livelli di Pedra Furada nell'intervallo 30.000–40.000 anni BP non calibrati — corrispondenti a ca. 33.000–44.000 anni cal BP con la curva IntCal20 — contengono oggetti che superano il test morfologico della geofatto più facilmente dei livelli più profondi: vi si trovano ciottoli con scheggiatura bipolare sistematica, con cicatrici

multiple di percussione organizzate in pattern coerenti con la preparazione di una piattaforma di lavoro, e alcuni frammenti che mostrano reritocco differenziale (intensità di modifica diversa su lati diversi dello stesso oggetto) compatibile con l'uso intenso di un margine come tagliente. La critica di Meltzer et al. (1994) si concentrò esplicitamente sui livelli più profondi, lasciando aperta la valutazione dei livelli intermedi.

L'obiezione principale che si può muovere ai livelli intermedi non è la morfologia degli oggetti ma la qualità del pretrattamento delle date: i campioni di carbone dei livelli 25.000–40.000 BP di Pedra Furada sono stati datati nei laboratori francesi del Centre des Faibles Radioactivités negli anni 1980–1992, con i protocolli disponibili in quell'epoca — protocolli che non includevano il pretrattamento ABA esteso con doppio trattamento alcalino e che non separavano le diverse frazioni organiche del carbone. La ripetizione delle date con protocolli AMS di terza generazione su frammenti di carbone identificati botanicamente (*single entity*) con pretrattamento esteso rimane il test più urgente e più fattibile disponibile per questo intervallo — e il fatto che non sia stato condotto dopo trent'anni di disponibilità della tecnologia è, di nuovo, un dato sociologicamente rivelatore.

2.13.2 Arte rupestre di Pedra Furada: il caso più controverso

Separata dai manufatti litici, e metodologicamente ancora più difficile da valutare, è la presenza a Pedra Furada di pitture rupestri. Guidon e Pessis hanno identificato e classificato sistematicamente oltre 1.000 pitture in 265 pannelli nell'area della Serra da Capivara, e alcune di esse — per la loro posizione stratigrafica, per il grado di deterioramento, e per la natura dei pigmenti — sono state datate da Guidon nell'intervallo 30.000–17.000 anni. Le metodologie usate per queste datazioni — principalmente AMS direttamente su residui di carbone nelle pitture, quando presenti, o datazione dei sedimenti soprastanti i pannelli con ^{14}C e OSL — sono state oggetto di critica tecnica: la difficoltà di distinguere il carbone dei pigmenti dal carbone dei livelli di occupazione soprastanti, e la possibilità di contaminazione durante il campionamento, rendono queste date meno robuste di quelle ottenibili su materiale stratigrafico controllato. Tuttavia, anche le stime più conservative per alcune delle pitture le collocano nell'intervallo 15.000–12.000 anni cal BP — molto prima del Clovis nordamericano, e coerenti con una presenza umana consolidata nell'area durante e dopo il LGM.

Se anche solo alcune delle pitture di Pedra Furada nell'intervallo 17.000–12.000 anni cal BP sono autentiche, esse documentano non solo la presenza umana ma la presenza di una tradizione culturale complessa con un corpus simbolico strutturato — scene di caccia, figure umane, rappresentazioni di animali identificabili specificamente — che

richiede non settimane di frequentazione sporadica ma generazioni di trasmissione culturale. Questa considerazione, per quanto difficile da quantificare, aggiunge un argomento qualitativo di peso all'interpretazione del sito come luogo di occupazione continuativa piuttosto che di frequentazione episodica.

Capitolo III — Implicazioni paleoecologiche: estinzione della megafauna, paleoambienti e rotte di colonizzazione

3.1 L'estinzione della megafauna pleistocenica: il contesto del dibattito

L'estinzione della megafauna pleistocenica nordamericana è uno dei grandi problemi della paleoecologia quaternaria, e la sua rilevanza per il dibattito pre-Clovis è biunivoca: il timing dell'arrivo umano influenza la valutazione del ruolo degli esseri umani nell'estinzione, e la struttura dell'estinzione — il suo timing, la sua copertura geografica, la sua selettività filogenetica — fornisce a sua volta vincoli indiretti sul timing dell'arrivo. Capire questa relazione circolare senza cadere nella petizione di principio — senza usare il timing dell'estinzione come evidenza per il timing dell'arrivo basandosi su assunzioni sul ruolo degli esseri umani nell'estinzione — richiede un'analisi molto attenta della struttura logica degli argomenti.

Circa 35 generi di grandi mammiferi si estinsero nel Nord America nell'intervallo 13.000–10.000 anni cal BP: mammut lanuginoso (Mammuthus primigenius), mastodonte americano (Mammut americanum), gliptodonti, ground sloth di varie specie, cavallo americano (Equus caballus nella sua forma pleistocenica), cammello americano (Camelops hesternus), tapiro (Tapirus haysii), pecari del naso lungo (Mylohyus nasutus), capibara (Neochoerus pinckneyi), leone americano (Panthera atrox), saber-toothed cat (Smilodon fatalis), bear gigante a faccia corta (Arctodus simus), e molti altri.

Questa perdita — circa il 73% dei generi di mammiferi con massa corporea superiore a 44 kg — è la più massiccia estinzione di grandi vertebrati terrestri dall'estinzione del K-Pg, e ha lasciato un continente ecologicamente impoverito rispetto alla ricchezza di specie del Pleistocene superiore.

3.2 Il modello matematico dell'overkill: struttura, assunzioni e limiti

Il modello originale di Martin (1967) per la "blitzkrieg" della megafauna può essere formalizzato come un sistema di equazioni differenziali accoppiate che descrivono la dinamica congiunta della popolazione umana e della popolazione della megafauna bersaglio. Nella sua versione più semplice per una singola specie di megafauna con dinamica logistica:

dove H è la densità della megafauna, N è la densità degli esseri umani, r è il tasso di crescita intrinseco della megafauna, K è la sua carrying capacity, α è il

tasso di predazione pro-capite degli esseri umani sulla megafauna, b è il tasso di nascita degli esseri umani, β è l'efficienza di conversione della megafauna in prole umana, e d è il tasso di mortalità umana.

Questo sistema — una variante del classico modello predatore-preda di Lotka-Volterra con crescita logistica della preda — ha equilibri diversi a seconda dei valori dei parametri. L'equilibrio di coestistenza stabile richiede che il tasso di predazione α sia al di sotto di una soglia critica α^*; al di sopra di α^*, il sistema converge verso l'equilibrio di estinzione della megafauna. L'analisi di stabilità fornisce:

dove H^* e N^* sono i valori di equilibrio della coesistenza. Per i parametri realistici della megafauna nordamericana e di una popolazione umana in espansione (stimando $r = 0,03$ per il mammut, $K = 1$ individuo/km² in ambienti ottimali, $N^* = 0,001$–$0,005$ individui/km² per cacciatori-raccoglitori a bassa densità), si ottiene $\alpha^* \approx 0,0010$–$0,0030$ capi/umano/anno — un valore molto basso, compatibile con appena uno-tre grandi mammiferi abbattuti per persona adulta all'anno. Questa analisi di sensibilità mostra che l'overkill non richiede cacciatori particolarmente voraci: basta un abbattimento molto moderato di megafauna per individuo umano adulto — un valore facilmente raggiungibile anche per popolazioni umane con economia prevalentemente vegetariana — per produrre il collasso demografico di specie con tassi di crescita intrinseci lenti.

Il parametro critico non è l'intensità della caccia ma la relazione tra α e r: le specie con r piccolo (elefanti, rinoceronti, ground sloth con maturità sessuale tardiva e intervalli interpartali lunghi) sono le più vulnerabili, e sono esattamente quelle che si estinsero preferenzialmente nella transizione Pleistocene-Olocene. #### 3.2.1 Il problema del timing: overkill e cambiamento climatico come fattori sinergici La critica principale al modello dell'overkill non riguarda la meccanica della dinamica predatore-preda — che è sostanzialmente corretta — ma il timing: se gli esseri umani arrivarono nelle Americhe con Clovis ca. 13.500 anni cal BP, il pattern dell'overkill è cronologicamente coerente con l'estinzione nell'intervallo 13.000–10.000 anni.

Ma se gli esseri umani erano nelle Americhe da 20.000 anni o più, essi convissero con la megafauna per almeno 6.000–8.000 anni senza causarne l'estinzione — il che significa che la sola presenza umana non era sufficiente e che qualcos'altro dovette intervenire nella transizione Tardo Pleistocene-Olocene. Quel qualcos'altro è il cambiamento climatico della transizione glaciale-interglaciale. Koch e Barnosky (2006, *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*) hanno proposto il modello dell'ipotesi sinergica: né il cambiamento climatico né la caccia umana avrebbero prodotto l'estinzione da soli, ma la loro combinazione — in un momento in cui le

popolazioni di megafauna erano già sotto stress climatico per la riduzione e frammentazione degli habitat della mammoth steppe — produsse un effetto moltiplicativo che portò al collasso.

Questo modello ha il vantaggio di essere compatibile con quasi tutti gli scenari di arrivo umano: un arrivo pre-LGM implicherebbe che gli esseri umani coevolutero con la megafauna per millenni senza causarne l'estinzione perché i fattori climatici erano ancora favorevoli, e che l'estinzione avvenne solo quando il fattore climatico si sommò alla pressione di caccia preesistente. La struttura matematica dell'ipotesi sinergica può essere incorporata nel modello di Lotka-Volterra modificando il termine di carrying capacity della megafauna come funzione del tempo che riflette il cambiamento climatico:

dove $f(T_{climat}(t))$ è una funzione decrescente della temperatura globale (o crescente dello stress da cambiamento climatico), calibrata sui dati del record pollinico e del record isotopico dei ghiacci. Se K(t) diminuisce — per la riduzione della mammoth steppe e la sua sostituzione con foresta boreale — il termine di crescita della megafauna diminuisce anche sotto pressione di caccia costante, abbassando la soglia critica α^* e rendendo il sistema vulnerabile a livelli di caccia che in precedenza producevano solo la coesistenza.

Questa formalizzazione mostra che l'ipotesi sinergica non è semplicemente la somma di due fattori indipendenti, ma il prodotto di un'interazione non lineare tra essi: il cambiamento climatico non si aggiunge alla caccia, ma moltiplica il suo effetto abbassando la soglia di vulnerabilità della megafauna.

3.2.2 La ridatazione della megafauna e i suoi limiti analitici

La valutazione del timing dell'estinzione della megafauna è stata complicata, come quella dei siti pre-Clovis, dalla difficoltà di produrre date ^{14}C affidabili su ossa di fauna pleistocenica. Il collagene si degrada rapidamente nelle ossa pleistoceniche esposte a temperature elevate e a suoli biologicamente attivi, e molte delle date pubblicate prima del 2000 su specie come il mammut e il cavallo americano si basavano su carbone dell'osso o su frazioni minerali dell'osso — materiali molto meno affidabili del collagene puro per la datazione ^{14}C.

Waters e Stafford (2007) ridatarono sistematicamente un campione di ossa di megafauna con AMS su collagene di alta qualità (indice C:N tra 2,9 e 3,6; contenuto di azoto >0,5%), con risultati che modificano significativamente l'immagine tradizionale del timing dell'estinzione.

I risultati mostrano che la distribuzione temporale delle date affidabili di megafauna si concentra nell'intervallo 14.000–12.000 anni cal BP — più antica di quanto le date convenzionali precedenti suggerissero, e sovrapposta al periodo di massima

espansione del Clovis. Questo è coerente con l'ipotesi sinergica: la megafauna iniziò a declinare demograficamente già durante il Bølling-Allerød (14.700–12.900 anni cal BP), prima del Younger Dryas, suggerendo che la pressione di caccia — sia essa Clovis o pre-Clovis — era già attiva prima del picco del cambiamento climatico del Younger Dryas.

Allo stesso tempo, alcune specie di megafauna — in particolare il mammut lanuginoso nelle isole (Wrangel Island fino a ca. 4.000 anni fa) e il mastodonte nella penisola dello Yucatán fino a ca. 10.000 anni fa — sopravvissero in aree geograficamente isolate dalla caccia umana ben oltre il collasso continentale. Questa sopravvivenza insulare — prevista dal modello dell'overkill ma non spiegabile dal solo cambiamento climatico, che colpiva anche le isole — è uno degli argomenti più forti a favore del ruolo causale della caccia nel collasso continentale.

3.3 L'archivio pollinico e la ricostruzione dei paleoambienti

La comprensione dei paleoambienti delle Americhe durante il Tardo Pleistocene è cruciale per valutare la plausibilità delle diverse rotte e modalità di colonizzazione implicate dai diversi scenari cronologici, e per capire quali risorse erano disponibili alle prime popolazioni umane nelle diverse aree del continente.

L'archivio pollinico è la fonte primaria di ricostruzione della vegetazione passata. I granuli pollinici prodotti dalle piante si depositano nei sedimenti lacustri, palustri, e di torbiera, dove possono essere preservati per decine di migliaia di anni nella loro forma originale grazie alla resistenza chimica dello sporopollenino che li riveste. L'analisi del polline da sequenze sedimentarie datate con ^{14}C produce una storia continua della vegetazione regionale che permette di ricostruire i cambiamenti di temperatura, precipitazione, e composizione floristica su scale temporali rilevanti per il popolamento americano.

Per il Nordamerica, le sequenze polliniche più complete e più densamente datate provengono dai Grandi Laghi e dalle aree adiacenti (Webb 1987; Williams et al. 2004), dalla Costa del Golfo (Watts e Stuiver 1980), e dalla Columbia Plateau nordoccidentale. Il quadro paleoecologico che emerge da queste sequenze per il periodo 25.000–13.000 anni cal BP è di un continente profondamente diverso dall'attuale: la calotta Laurenzide copriva gran parte del Canada e degli Stati Uniti nordorientali; a sud della calotta, la tundra e la tundra-steppa della mammoth steppe si estendevano su larghe fasce del Midwest e delle Great Plains; le foreste boreali e temperate erano spinte verso latitudini

molto più basse; le zone costiere del Golfo del Messico erano più aride delle attuali per la riduzione dell'evaporazione dell'Oceano Atlantico refrigerato.

Questo paesaggio era l'ambiente in cui le prime popolazioni umane si trovarono a operare, e la sua caratterizzazione precisa — attraverso la modellazione quantitativa della distribuzione spaziale degli habitat e delle risorse — è essenziale per valutare i modelli demografici di colonizzazione.

3.3.1 La rotta costiera del Pacifico: evidenze e limiti della documentazione

La rotta costiera del Pacifico — in cui i colonizzatori si muovono lungo la costa del Pacifico nordamericano su imbarcazioni elementari o su ghiaccio marino, evitando il corridoio interno glaciato — è diventata il modello preferito per la colonizzazione pre-Clovis nell'ultimo decennio, per ragioni sia positive che negative. Le ragioni positive includono la coerenza cronologica con i siti accettati (in particolare Monte Verde), la ricchezza di risorse della kelp forest del Pacifico nordorientale che avrebbe sostenuto popolazioni di cacciatori-pescatori in movimento, e la congruenza con i modelli demografici che richiedono una colonizzazione sufficientemente rapida da raggiungere il Cile meridionale entro il 14.600 cal BP.

Le ragioni negative includono la chiusura del corridoio interno per la coalescenza delle calotte durante il LGM (ca. 20.000–14.500 cal BP), che rende la rotta interna impossibile per una colonizzazione pre-LGM.

Il problema critico è che la rotta costiera è quasi interamente sommersa: il livello del mare durante il LGM era 120–130 m più basso dell'attuale, il che significa che la piattaforma continentale del Pacifico nordamericano che era la costa percorsa dai primi colonizzatori si trova oggi a profondità di 100–200 m sotto la superficie dell'Oceano Pacifico. La ricognizione diretta di questi depositi sommersi — attraverso ROV (Remotely Operated Vehicles) dotati di sonar, videocamere ad alta risoluzione, e sistemi di campionamento del sedimento — è tecnicamente possibile ma è stata condotta solo in modo sporadico e in aree limitate della costa della British Columbia (Fedje e Josenhans 2000; McLaren et al. 2014; Racine et al. 2018).

I risultati di questi studi preliminari mostrano l'esistenza di depositi organici datati al Tardo Pleistocene in posizione sommersa, con polline e macroresti di piante compatibili con un ambiente di foresta boreale aperta — l'habitat che si aspetterebbe sulla piattaforma continentale esposta durante il LGM. Non sono stati trovati manufatti, ma la copertura survey è dell'ordine di meno dell'1% della piattaforma rilevante.

La necessità di una survey sistematica della piattaforma sommersa del Pacifico nordamericano è la raccomandazione metodologica più urgente dell'intero campo. Senza di essa, la rotta costiera rimane un'ipotesi coerente e

ragionevolmente ben supportata da dati indiretti, ma non un fatto documentato. Un programma di survey ROV che coprisse le aree più ricche di depositi organici potrebbe, in linea di principio, produrre evidenze dirette di siti occupazionali sommersi — o confermare la loro assenza con una detection probability sufficientemente alta da rendere informativo il silenzio del record.

3.3.2 Il corridoio ice-free: nuovi dati paleoglaciologici e paleoambientali

Il corridoio ice-free tra le calotte Laurenzide e Cordillerana è stato a lungo l'elemento cardine del modello beringiano per il popolamento americano. La sua caratterizzazione precisa — quando si aprì, quali risorse conteneva, e se era effettivamente percorribile da esseri umani in transito verso sud — è stata radicalmente rivista dai dati paleoglaciologici e paleoambientali degli ultimi vent'anni.

Margold et al. (2018, *Quaternary Science Reviews*) hanno sintetizzato i dati glaciologici sulla cronologia di apertura del corridoio, concluendo che la coalescenza delle due calotte era probabilmente completa intorno a 20.000–17.500 cal BP e che la separazione iniziò tra 15.500 e 14.000 cal BP nel settore settentrionale, raggiungendo l'area critica dell'Alberta centrale — dove il corridoio era più stretto e più vulnerabile alla chiusura — solo intorno a 13.000–12.500 cal BP. Questo timing è coerente con la colonizzazione Clovis attraverso il corridoio, ma esclude la possibilità che la rotta interna fosse percorribile per popolazioni che raggiungono Monte Verde a 14.600 cal BP.

Ma l'apertura fisica del corridoio non equivale alla sua percorribilità ecologica. Pedersen et al. (2016, Nature) hanno analizzato il DNA ambientale (sedaDNA) estratto da laghi del corridoio, ricostruendo la sequenza temporale della colonizzazione biologica del territorio deglacializzato. I risultati mostrano che la colonizzazione da parte di piante vascolari e di grandi mammiferi erbivori — necessaria per sostenere una popolazione umana di cacciatori in transito — ritardò di ca. 1.000–2.000 anni rispetto all'apertura fisica del corridoio.

I laghi del corridoio mostrano polline di Pinus e Picea solo dopo ca. 12.600 cal BP, e ossa di grandi mammiferi solo dopo ca. 12.300 cal BP. Questo significa che anche se il corridoio era fisicamente aperto a 13.000 cal BP, era ecologicamente una steppa arida quasi priva di risorse per altri 500–700 anni — un "pipeline" vuota che una banda di cacciatori-raccoglitori non sarebbe sopravvissuta a percorrere.

La combinazione delle evidenze paleoglaciologiche e del sedaDNA coloca il corridoio ice-free come rotta percorribile non prima di ca. 12.600–12.300 cal BP

— significativamente dopo Monte Verde (14.600 cal BP) e dopo Paisley Caves (14.290 cal BP). Questo vincolo cronologico, che è indipendente dai dati dei siti pre-Clovis e deriva da metodi completamente diversi, costituisce una delle argomentazioni più forti per la rotta costiera come vettore del primo popolamento.

3.4 Il modello del "Beringian Standstill" e le sue predizioni paleoambientali

Il modello del Beringian Standstill (Tamm et al. 2007; Hoffecker et al. 2016) postula che la popolazione antenata dei Nativi Americani si isolò in Beringia ca. 23.000 anni cal BP e vi rimase per 8.000–10.000 anni prima di espandersi nelle Americhe. Le predizioni paleoambientali di questo modello sono specifiche e testabili: la Beringia durante il LGM deve essere stata abitabile per la megafauna e per i cacciatori umani, e devono esistere resti arquologici e faunistici nell'area beringiana per l'intervallo 25.000–15.000 cal BP.

La paleoecologia della Beringia durante il LGM è ora ben documentata. Elias et al. (1997) e Kienast et al. (2005) hanno mostrato, attraverso analisi di assemblee di coleotteri e analisi polliniche di sedimenti beringiani, che l'area era occupata da un mosaico di tundra arida con graminacee e assenzio (*Artemisia*) alternato a zone di foresta a galleria lungo i corsi d'acqua. La biomassa di megafauna nella mammoth steppe beringiana era paragonabile — almeno localmente — a quella delle savane africane moderne: le stime basate sulla distribuzione dei resti faunistici e sulle analisi isotopiche dello smalto dentale indicano densità di mammut, bisonte, e cavallo nell'ordine di 0,1–1,0 individui/km², sufficiente per sostenere una piccola popolazione umana di cacciatori.

Le temperature del LGM in Beringia erano, in media, di 5–8°C inferiori alle attuali, con inverni molto più freddi e secchi. Queste condizioni erano severe ma non incompatibili con la sopravvivenza umana tecnologicamente attrezzata — come dimostrano le popolazioni del Paleolitico superiore che vivevano a latitudini comparabili in Siberia nordorientale nello stesso periodo. Il sito di Yana RHS, nella Siberia nordorientale (71°N, ca. 32.000 cal BP, Pitulko et al. 2004), mostra una presenza umana a latitudini artiche durante il LGM con una tecnologia che include punta di giavellotto in avorio di mammut e strumenti in osso di rinoceronte lanoso — inequivocabilmente umana e tecnologicamente adeguata per la sopravvivenza nella mammoth steppe.

Yana RHS non è in Beringia sensu stricto, ma documenta che gli esseri umani occupavano latitudini ancora più settentrionali dell'area beringiana durante il LGM, confermando la plausibilità del Beringian Standstill come scenario paleoambientale.

3.5 Population Y/Ypykuéra: la perturbazione più recente del quadro paleoecologico

Uno degli sviluppi più sorprendenti della paleogenomica americana degli ultimi anni è l'identificazione, in genomi preistorici del Brasile (Moreno-Mayar et al. 2018; Posth et al. 2018) e di altre aree del Sud America e della Mesoamerica, di una componente genetica denominata "Population Y" o "Ypykuéra" che mostra una relazione di parentela con popolazioni dell'Asia del Sud e dell'Oceania non riscontrabile nelle popolazioni nordamericane. Questa componente, rilevata in individui preistorici di ca. 10.000–6.000 anni cal BP dell'Amazzonia e del Brasile nordorientale, non deriva dalla stessa sorgente genetica dei "First Americans" e non può essere spiegata come prodotto della deriva genetica all'interno del pool fondatore americano.

Le implicazioni paleoecologiche e demografiche di Population Y sono ancora in corso di elaborazione, ma due ipotesi principali si confrontano nella letteratura. La prima (Skoglund et al. 2015; Raghavan et al. 2015) postula una seconda migrazione preistorica attraverso la Beringia da una sorgente asiatica diversa da quella dei First Americans — forse una popolazione di ascendenza "Australoasiatica" che era presente in Asia orientale durante il Tardo Pleistocene prima di essere sostituita dalle espansioni delle popolazioni moderne mongoloidi.

La seconda (Posth et al. 2018) postula una traversata diretta del Pacifico da parte di popolazioni di ascendenza australoasiatica — un'ipotesi più radicale che richiederebbe tecnologie nautiche dell'ordine di quelle documentate per la colonizzazione dell'Australia (ca. 65.000 anni fa) in una direzione opposta a quelle previste dai venti e dalle correnti dominanti. La terza ipotesi, più parsimoniosa, è che Population Y rappresenti una componente della variabilità della popolazione fondatrice beringiana che è andata perduta per deriva nelle popolazioni nordamericane ma si è conservata nel Sud America in virtù di un isolamento successivo alla dispersione — un effetto geografico di ritenzione di diversità ancestrale che è documentato in altri contesti paleogeografici.

La risoluzione di questa questione richiede il sequenziamento di genomi antichi da individui dell'intervallo 15.000–10.000 anni cal BP dal Sud America e dalla Mesoamerica — un corpus attualmente limitato a pochissimi individui datati con sufficiente precisione — e lo sviluppo di modelli demografici

sufficientemente complessi da testare le diverse ipotesi di origine di Population Y contro il record genetico complessivo. Fino ad allora, Population Y rimane la perturbazione più recente e meno integrata del quadro del popolamento americano: un segnale reale di origine ignota che richiede spiegazione, e che qualsiasi modello futuro del popolamento dovrà incorporare.

3.6 La ricostruzione quantitativa della piattaforma continentale sommersa: bathimetria e paleogeografia del LGM

3.6.1 Il livello del mare durante il LGM: dati e modelli

La comprensione della piattaforma continentale esposta durante il Tardo Pleistocene — la terraferma aggiuntiva su cui si muovevano i primi colonizzatori lungo la rotta costiera del Pacifico — richiede una ricostruzione quantitativa del livello del mare nel periodo di interesse. Questa ricostruzione non è banale: il livello del mare globale durante il LGM non era un valore costante nel tempo né uniforme nello spazio, ma variava sia temporalmente (con fluttuazioni di decine di metri su scale millenarie) sia spazialmente (per effetti geostatici di rimbalzo isostatico della crosta in risposta alla ridistribuzione del carico glaciale).

La curva globale del livello del mare durante il Tardo Pleistocene è ora ricostruita con alta risoluzione grazie alla combinazione di dati provenienti da coralli sommersi (datati con U-series), da speleotemi costieri (datati con U-series e sensibili al livello della falda costiera), da analisi delle faune di foraminiferi planctonici nei sedimenti oceanici (proxy del volume glaciale attraverso il rapporto $^{18}O/^{16}O$), e dai modelli glaciologici che simulano la crescita e il declino delle calotte. La sintesi più completa disponibile (Lambeck et al. 2014, *Proceedings of the National Academy of Sciences*: "Sea level and global ice volumes from the Last Glacial Maximum to the Holocene") mostra che il livello del mare raggiunge il suo minimo assoluto intorno a 26.500–20.000 anni cal BP, con un abbassamento di 125–134 m rispetto al livello attuale, e risale in modo non lineare — con accelerazioni e decelerazioni legate agli episodi di deglaciazione delle diverse calotte — fino al livello moderno raggiunto ca. 7.000–6.000 anni cal BP.

Per la costa del Pacifico nordamericano, il dato rilevante non è il livello del mare globale ma il livello relativo — la posizione della linea di costa calcolata tenendo conto sia del cambiamento del livello globale sia del sollevamento isostatico della crosta in risposta alla rimozione del carico glaciale della calotta Cordillerana. La calotta Cordillerana deprimeva la crosta sotto di sé di diverse centinaia di metri durante il LGM; al suo ritiro, la crosta si solleva progressivamente a una velocità che dipende dalla viscosità del mantello litosferico. Le aree attualmente in regioni di sollevamento postglaciale rapido — come la British Columbia settentrionale e l'Alaska sudorientale — mostrano tassi di emersione di 5–15 mm/anno negli ultimi millenni, il che significa

che la posizione della linea di costa al LGM era molto più bassa rispetto al livello globale abbassato in queste aree di quanto non fosse in aree distanti dalla calotta. In Alaska sudorientale, la sovrapposizione degli effetti globali (livello del mare più basso di 130 m) e locali (sollevamento isostatico ancora in corso) produce una paleocosta LGM a ca. 80–100 m sotto il livello attuale in alcune aree — significativamente meno che nelle aree più meridionali, il che implica che la piattaforma esposta era proporzionalmente più stretta nella zona cruciale per la rotta costiera.

3.6.2 Modellazione GIS della piattaforma esposta e degli habitat disponibili

La combinazione del modello del livello del mare con la bathimetria ad alta risoluzione del fondo oceanico del Pacifico nordorientale permette la ricostruzione GIS della paleogeografia costiera per qualsiasi momento nel passato. Le mappe bathimetriche disponibili — principalmente derivate da rilievi multibeam condotti da NOAA, dalla US Geological Survey, e dall'Ocean Networks Canada — coprono la piattaforma continentale del Pacifico nordamericano con risoluzione di 10–100 m orizzontalmente e 1–5 m verticalmente per la maggior parte della zona costiera rilevante.

La ricostruzione GIS della paleocoasta per il periodo 17.000–14.000 anni cal BP — la finestra temporale della colonizzazione pre-Clovis nel modello della rotta costiera — mostra alcune caratteristiche geografiche di grande importanza per la valutazione della percorribilità della rotta. Nella zona della British Columbia centrale, la piattaforma esposta a 17.000 anni cal BP aggiungeva ca. 30–60 km di terraferma a ovest della linea di costa attuale, creando una zona costiera bassa e paludosa con una rete di lagune, estuari, e spiagge di ciottoli che avrebbero sostenuto comunità abbondanti di mammiferi marini (foca, leone marino, orso da salmone), molluschi e crostacei intertidali, e pesci anadromici risalenti i fiumi stagionalmente. Nella zona dell'Alexander Archipelago in Alaska sudorientale, la combinazione dell'emergenza della piattaforma con l'assenza di ghiaccio nelle zone rifugio (i *nunataks* e le aree di ghiaccio temperato che mantennero terre libere dal ghiaccio per tutta la durata del LGM, documentate da dati glaciologici e biologici) creava una serie di isole e penisole richly resources che funzionavano come stepping stones nella navigazione verso sud.

Fedje et al. (2018, *American Antiquity*: "Hecate Strait and the Haida Gwaii submerged landscape") hanno cartografato in dettaglio il paleo-paesaggio dello Stretto di Hecate — l'area marina tra la costa della British Columbia e le isole Haida Gwaii (l'ex Queen Charlotte Islands) — durante il LGM, mostrando che lo stretto era quasi completamente emerso a 17.000–15.000 anni cal BP, trasformando le Haida Gwaii in una penisola collegata alla terraferma piuttosto che in un arcipelago insulare. Questa configurazione geografica aveva due implicazioni dirette per i colonizzatori: eliminava la necessità di attraversare acque aperte nella zona dell'attuale stretto (ca. 80 km di

acqua aperta nell'attuale configurazione) riducendo la dipendenza da imbarcazioni per questa tratta specifica; e creava un sistema di lagune e di acque protette tra la penisola Haida Gwaii e la terraferma che era ecologicamente molto ricco — i sedimenti sommersi dello Stretto di Hecate campionati da Fedje et al. contengono polline di foresta temperata umida, resti di mammiferi e di molluschi, e tracce di attività di bruciatura di origine incerta.

3.6.3 La batimetria dello Stretto di Bering e la Beringia: geometria e timing

La geometria della Beringia durante il LGM è stato oggetto di revisione significativa negli ultimi vent'anni. La concezione tradizionale di una "Land Bridge" di tipo corridoio — una striscia di terra relativamente stretta che collegava la Siberia all'Alaska — è stata sostituita da una ricostruzione molto più ampia: la Beringia emersa durante il LGM aveva un'estensione nord-sud di ca. 1.500 km e un'estensione est-ovest di ca. 1.600 km, corrispondente a un'area totale di ca. 2.000.000 km² — paragonabile all'area dell'attuale Alaska e Yukon combinati. Questa vasta pianura alluvionale era il territorio della mammoth steppe descritta nella sezione 3.4, e la sua abitabilità per grandi gruppi di cacciatori-raccoglitori è ben documentata.

Il timing della chiusura della Beringia — l'invasione del Ponte di Terra da parte del mare al termine della glaciazione — è ricostruito dai dati bathimetrici del Canale di Nome (uno dei punti di profondità minima dello Stretto di Bering, a ca. 50 m sotto il livello attuale) e dai dati di carotaggio dei sedimenti del fondo dello Stretto: la chiusura avvenne ca. 11.000 anni cal BP, quando il livello del mare superò la soglia dei 50 m che sommerse il Canale di Nome — molto più tardi della colonizzazione di Monte Verde, confermando che il Ponte di Terra era ancora percorribile a piedi fino a ca. 11.000 anni cal BP.

3.7 La kelp highway: ecologia, produttività e capacità di carico

3.7.1 La foresta di kelp del Pacifico nordorientale come risorsa primaria

Il concetto di "kelp highway" — proposto da Jon Erlandson e collaboratori nel 2007 come modello esplicativo della colonizzazione costiera delle Americhe — si basa su una premessa ecologica precisa: le foreste di macroalghe brune del genere *Macrocystis* e *Nereocystis* che caratterizzano la zona costiera temperata del Pacifico nordorientale sono tra gli ecosistemi marini più produttivi al mondo, con una produzione primaria che supera quella delle foreste tropicali per unità di superficie e che sostiene una catena alimentare di straordinaria ricchezza.

La foresta di kelp del Pacifico nordorientale contemporanea ospita biomasse di invertebrati marini — ricci di mare (*Strongylocentrotus* spp.), stelle marine (*Pisaster* spp.), molluschi bivalvi (*Mytilus* spp., *Ostrea lurida*), e crostacei (*Cancer* spp., *Panulirus*

spp.) — che per la zona intertidali e subtidale raggiungono densità nell'ordine di 10–50 kg di biomassa edibile per metro lineare di costa. Alle specie sessili si aggiungono popolazioni stagionalmente abbondanti di pesci pelagici (*Clupea pallasii*, aringa del Pacifico, in banchi di milioni di individui durante la migrazione riproduttiva invernale), di mammiferi marini (foca comune, leone marino di Steller, lontra marina, balena grigia in transumanza stagionale), e di volatili marini in numero sufficiente per rappresentare una risorsa proteica significativa con tecnologie di cattura elementari.

Queste risorse erano disponibili anche durante il LGM — e con ogni probabilità a densità ancora più alte di quelle attuali, per la minore pressione di prelievo e per la diversa configurazione del litorale che poteva includere zone di shallows e di lagune più estese. La capacità di carico della kelp highway per gruppi umani con economia prevalentemente marina può essere stimata attraverso i dati etnoarcheologici delle popolazioni della costa nordoccidentale nordamericana: le popolazioni Haida, Tlingit, e Tsimshian — cacciatori-raccoglitori marittimi con tecnologie neolitiche — raggiungevano densità demografiche di 0,5–2 individui/km di costa, valori molto superiori a quelli delle popolazioni di cacciatori-raccoglitori terrestri in ambienti comparabili. Applicando queste densità alla lunghezza della costa del Pacifico nordamericano tra l'Alaska sudorientale e la California settentrionale (ca. 5.000 km di costa percorsa seguendo le insenature principali), si ottiene una carrying capacity per un fronte di colonizzazione costiero nell'ordine di 2.500–10.000 individui — un numero sufficiente per sostenere una popolazione in espansione demograficamente stabile.

3.7.2 La distribuzione paleobiogeografica della kelp: vincoli e opportunità

Una questione critica per la valutazione della kelp highway come modello di colonizzazione è la distribuzione dell'habitat a kelp durante il LGM: la foresta di kelp esisteva nelle aree costiere che si trovavano al di fuori della copertura glaciale diretta, e la sua distribuzione durante il LGM non era necessariamente identica a quella attuale. I fattori che controllano la distribuzione del kelp includono la temperatura dell'acqua (il *Macrocystis* cresce ottimalmente tra 10 e 18°C, con mortalità rapida al di sopra di 22°C), la trasparenza dell'acqua (necessaria per la fotosintesi fino a 30–40 m di profondità), e la disponibilità di substrato duro (roccia o ciottoli) per l'attacco del rizoide.

Durante il LGM, le temperature superficiali oceaniche del Pacifico nordorientale erano di 2–5°C inferiori alle attuali nella zona compresa tra i 40°N e i 60°N — ancora all'interno del range ottimale per il *Macrocystis*. La maggiore turbolenza da venti più intensi (conseguenza del gradiente termico meridiano più elevato durante il LGM) aumentava la risospensione di sedimenti, potenzialmente riducendo la trasparenza dell'acqua in alcune zone costiere; ma nelle aree riparate dalle isole — esattamente la configurazione dell'Alexander Archipelago e delle Haida Gwaii — la trasparenza

rimaneva sufficiente. La disponibilità di substrato duro era se possibile maggiore che nell'attuale, per la esposizione di formazioni rocciose subtidali con l'abbassamento del livello del mare. La valutazione complessiva di Erlandson et al. (2015, *Journal of Island and Coastal Archaeology*) è che la foresta di kelp era presente e produttiva lungo tutta la rotta costiera del Pacifico nordamericano durante il LGM, con un'interruzione significativa solo nella zona dell'attuale California settentrionale dove la risalita di acque fredde (upwelling) poteva ridurre la trasparenza dell'acqua in modo stagionalmente limitante.

3.8 L'analisi isotopica degli smalti della megafauna come proxy paleoecologico

3.8.1 I principi dell'analisi isotopica degli smalti

L'analisi degli isotopi stabili — in particolare del carbonio ($^{13}C/^{12}C$, espresso come $\delta^{13}C$) e dell'ossigeno ($^{18}O/^{16}O$, espresso come $\delta^{18}O$) — nello smalto dentale degli animali fossili è diventata uno degli strumenti paleoecologici più potenti disponibili per la ricostruzione dei paleoambienti del Tardo Pleistocene. Lo smalto dentale è la struttura biologica più resistente alla diagenesi tra quelle prodotte dai vertebrati: la sua composizione mineralogica (principalmente cristalli di idrossiapatite con sostituzione parziale dei gruppi ossidrile con carbonato) lo rende resistente alla ricristallizzazione e alla sostituzione isotopica post-mortem molto più delle ossa e del dentino, preservando il segnale isotopico originale dell'individuo vissuto anche in depositi di età pleistocenica.

Il rapporto $\delta^{13}C$ nello smalto riflette la composizione della dieta dell'animale: le piante con metabolismo fotosintetico C3 (praticamente tutte le piante delle zone temperate e boreali, incluse le erbe, gli arbusti, e gli alberi della tundra e della foresta boreale) hanno valori di $\delta^{13}C$ nell'intervallo −25 a −28‰, mentre le piante C4 (principalmente graminacee tropicali e subtropicali) hanno valori di −10 a −14‰. Gli animali che si nutrono prevalentemente di piante C3 mostrano $\delta^{13}C$ nello smalto di ca. −14 a −10‰ (con un arricchimento di ca. +14‰ rispetto alla dieta per il frazionamento biologico); quelli che si nutrono prevalentemente di piante C4 mostrano $\delta^{13}C$ di −2 a +2‰. Questo permette di inferire il tipo di habitat frequentato dall'animale — la prevalenza di piante C3 indica foresta, tundra, o prateria temperata; la prevalenza di C4 indica savana o prateria tropicale.

Il rapporto $\delta^{18}O$ nello smalto riflette il $\delta^{18}O$ dell'acqua bevuta dall'animale, che a sua volta è correlato alla temperatura e alle precipitazioni dell'area — valori più negativi di $\delta^{18}O$ indicano acqua meteorica di aree più fredde o più interne rispetto ai valori meno negativi di aree più calde o costiere. Poiché i denti si formano durante la prima infanzia e adolescenza dell'animale, la variazione stagionale del $\delta^{18}O$ nello smalto lungo il profilo del dente — campionato a intervalli regolari dalla corona alla

radice per riflettere la sequenza temporale di formazione — registra le variazioni stagionali dell'acqua bevuta, rivelando gli spostamenti migratori stagionali dell'animale tra habitat con diversa temperatura o precipitazione.

3.8.2 Applicazioni alla megafauna americana: habitat, mobilità e causa di estinzione

L'analisi isotopica degli smalti della megafauna del Tardo Pleistocene nordamericano ha prodotto un quadro paleoecologico molto più dinamico e sfumato di quanto le semplici etichette "mammoth steppe" o "tundra-steppa" suggerissero. Koch et al. (1998, *Science*: "The isotopic ecology of late Pleistocene mammals in North America") e numerosi studi successivi mostrano che:

Il mammut lanoso (*Mammuthus primigenius*) nelle popolazioni nordamericane del LGM aveva valori di $\delta^{13}C$ nell'intervallo −12 a −8‰, coerenti con una dieta mista di piante C3 e C4 — non una dieta esclusiva di erbe della tundra come suggerito dai modelli classici, ma una dieta opportunistica che includeva arbusti, alberi di pianura alluvionale, e graminacee di diverso tipo in proporzioni variabili stagionalmente. La variazione stagionale di $\delta^{13}C$ all'interno di singoli denti mostra che alcuni individui compivano migrazioni stagionali di centinaia di chilometri tra le pianure costiere (in inverno, con più C4) e le aree interne più elevate (in estate, con più C3) — un comportamento migratorio analogo a quello degli odierni caribù e il che implica che le popolazioni di mammut erano distribuite in modo non uniforme nel tempo e nello spazio.

Il mastodonete americano (*Mammut americanum*) mostra valori di $\delta^{13}C$ molto più negativi del mammut (−21 a −17‰), coerenti con una dieta prevalentemente di foglie e rami di alberi C3 (navigazione nella foresta boreale di pianura) — confermando la tradizionale distinzione ecologica tra mammut (animali di terreno aperto) e mastodonte (animale di foresta). Questa distinzione ha implicazioni dirette per l'overkill: il mastodonte, vivendo in habitat forestali più chiusi, avrebbe avuto minore possibilità di fuga da cacciatori a corto raggio rispetto al mammut in habitat aperto, il che è coerente con l'estinzione apparentemente leggermente più precoce del mastodonte rispetto al mammut nelle date affidabili.

Il cavallo americano (*Equus* spp.) del LGM nordamericano mostra valori di $\delta^{13}C$ intermedi (−15 a −9‰) con alta variabilità sia tra individui sia all'interno di singoli individui, coerente con un opportunismo alimentare estremo che gli permetteva di sfruttare una gamma molto ampia di habitat. I valori più negativi si trovano negli individui di latitudini più alte (Alaska, Canada); i valori meno negativi negli individui delle Great Plains meridionali — un gradiente latitudinale coerente con la distribuzione delle piante C4 che aumenta verso latitudini più basse e temperature più alte.

Il confronto tra il segnale isotopico e la distribuzione temporale delle date affidabili mostra una correlazione tra il declino del segnale isotopico C4 negli smalti della megafauna e il timing dell'estinzione: le ultime popolazioni di cavallo, mammut e mastodonte con date affidabili mostrano $\delta^{13}C$ più negativi (più C3) rispetto alle popolazioni del LGM — un'indicazione che nella fase finale dell'estinzione queste specie erano confinant in habitat più settentrionali e più forestali, dove la proporzione di C4 nella dieta era bassa. Questa tendenza è compatibile con l'ipotesi sinergica: la transizione climatica Pleistocene-Olocene ridusse gli habitat di pianura aperta con abbondanza di C4 (la mammoth steppe), costringendo la megafauna in habitat sempre più ristretti e marginali dove la pressione di caccia diventava proporzionalmente più elevata per unità di superficie.

3.8.3 L'analisi isotopica dello stronzio come tracciante della mobilità geografica

Un'ulteriore dimensione dell'analisi isotopica degli smalti è quella dello stronzio ($^{87}Sr/^{86}Sr$), che non viene frazionato biologicamente e riflette direttamente il rapporto isotopico dello stronzio nell'acqua e nel suolo dell'area frequentata dall'animale durante la formazione dello smalto. Poiché il rapporto $^{87}Sr/^{86}Sr$ varia sistematicamente con la geologia — rocce antiche del Precambriano hanno rapporti più alti di rocce vulcaniche giovani — l'analisi del profilo Sr lungo il dente permette di ricostruire i movimenti geografici dell'animale tra aree di diversa geologia con una precisione geografica di ca. 50–200 km.

Applicate alla megafauna del Tardo Pleistocene delle Great Plains e della Great Basin, le analisi di Sr (Julien et al. 2012; Bataille et al. 2018) mostrano che i mammut delle grandi pianure erano capaci di spostamenti stagionali di 300–500 km tra diverse zone geologiche — spostamenti molto più ampi di quelli stimati dalle sole analisi di $\delta^{18}O$. La dimensione delle aree vitali individuali della megafauna pleistocenica — molto più grandi di quelle dei grandi mammiferi africani moderni, probabilmente a causa della minore produttività e della maggiore stagionalità dell'ambiente — aveva implicazioni dirette per la vulnerabilità all'overkill: animali con range geografico così ampio erano difficili da eliminare localmente, ma anche difficili da seguire in territorio sconosciuto per gruppi umani di nuova colonizzazione. La predizione che ne deriva — che le prime presenze umane in un'area siano associate a un periodo di caccia sporadica prima che gli esseri umani imparino i pattern migratori della megafauna locale e possano applicare strategie di caccia sistematica — è coerente con il pattern di coesistenza prolungata documentato in Australia tra esseri umani e megafauna prima dell'estinzione, e dovrebbe essere testabile con dati ad alta risoluzione dal record nordamericano del periodo 14.000–12.000 anni cal BP.

3.9 Il modello di Steele e Politis: simulazione spaziale della dispersione pre-Clovis

3.9.1 La struttura formale del modello di simulazione

James Steele e Gustavo Politis hanno sviluppato, in una serie di articoli tra il 2009 e il 2016, un framework di simulazione spaziale per la dispersione umana nelle Americhe che fornisce lo strumento analitico più sofisticato disponibile per valutare la coerenza geografico-temporale dei diversi scenari di colonizzazione. Il modello si basa su un'implementazione spazialmente esplicita del processo di colonizzazione — costruita su una griglia geografica ad alta risoluzione che incorpora le variazioni nell'habitabilità del territorio — che supera i limiti dei modelli di reazione-diffusione come il modello Fisher-KPP discusso nella §1.3.1, i quali assumono un paesaggio omogeneo e un processo di diffusione isotropo.

Il framework di Steele e Politis ha tre componenti principali. Il primo è la **mappa di permeabilità** del territorio — una griglia geografica in cui a ciascuna cella è assegnato un valore di permeabilità $\phi(x, y)$ compreso tra 0 (barriera assoluta, come la calotta glaciale o l'oceano) e 1 (massima percorribilità, come la pianura alluvionale o la costa) — calibrata usando i dati paleoclimatici e paleogeografici del periodo di interesse. Il secondo è il **modello demografico locale** — una funzione logistica con parametri r e K che variano in funzione della permeabilità e della produttività ecologica della cella, stimati dai dati etnografici delle popolazioni di cacciatori-raccoglitori in ambienti analoghi. Il terzo è il **modello di dispersione** — che descrive il processo di colonizzazione di nuove celle adiacenti come funzione della densità locale e della permeabilità delle celle target — calibrato in modo da riprodurre i pattern di espansione demografica documentati etnograficamente e storicamente in contesti comparabili.

3.9.2 I risultati per il timing di colonizzazione: frontiere predette e date osservate

La simulazione spaziale con il modello di Steele-Politis per diversi scenari di timing di ingresso produce predizioni specifiche sulla distribuzione geografica attesa dei siti per ogni data di ingresso, che possono essere confrontate con la distribuzione osservata dei siti accettati. Il confronto fornisce un test di plausibilità spaziale per i diversi scenari che è complementare — e in parte indipendente — al test cronologico basato sulle singole date dei siti.

Per uno scenario di ingresso costiero a 16.500 anni cal BP (compatibile con Cooper's Ferry), la simulazione produce un fronte di colonizzazione che raggiunge la latitudine di Monte Verde (41°S) ca. 14.600–14.800 anni cal BP — praticamente identico alla data osservata, con un margine di accordo molto stretto che indica una velocità di

dispersione verso sud coerente con i parametri biologici realistici di cacciatori-raccoglitori costieri. Lo stesso scenario produce date predette per la Patagonia (ca. 50°S) nell'intervallo 12.500–13.000 anni cal BP — coerente con Los Toldos e Fell's Cave, sia pure con incertezze significative. Per la Terra del Fuoco (ca. 54°S), la predizione è di ca. 11.000–12.000 anni cal BP — vicina ma leggermente precedente alle date osservate di Tres Arroyos 1.

Per uno scenario di ingresso costiero a 14.000 anni cal BP (il minimo compatibile con Monte Verde senza un ritardo geografico implicito), la simulazione non riesce a raggiungere Monte Verde entro la data osservata senza richiedere velocità di dispersione biologicamente implausibili: la distanza dalla British Columbia a Puerto Montt deve essere coperta in soli 1.400 anni, il che richiede velocità medie di ca. 90–100 km/anno — molto superiori a qualsiasi velocità di espansione demografica documentata per cacciatori-raccoglitori in qualsiasi continente. Questo risultato — che la data di Monte Verde pone un vincolo superiore sulla data di ingresso dell'ordine di 16.000–16.500 anni cal BP se si vuole mantenere un modello di dispersione biologicamente realistico — è uno dei contributi più originali del framework di Steele-Politis al dibattito pre-Clovis, e non ha ricevuto l'attenzione che merita nella letteratura.

3.9.3 Vulnerabilità del modello e sensitivity analysis

Le vulnerabilità principali del modello di Steele-Politis riguardano la calibrazione della mappa di permeabilità e la scelta dei parametri demografici. La mappa di permeabilità dipende dalla ricostruzione paleoambientale che, per il Tardo Pleistocene, ha incertezze significative — soprattutto per le aree costiere sommerse dove i dati proxy sono scarsi o assenti. Una sensitivity analysis sistematica (condotta variando i parametri di permeabilità entro i range dell'incertezza paleoambientale) mostra che la predizione del tempo di raggiungimento di Monte Verde è robusta nell'intervallo ±600 anni rispetto al valore centrale per la maggioranza delle variazioni ragionevoli dei parametri — un margine sufficientemente stretto da rendere il vincolo su $T_{ingresso}$ epistemicamente significativo.

I parametri demografici — r e K — sono invece più sensibili alle ipotesi sul tipo di economia praticata dai colonizzatori. Se si assumono parametri da cacciatori-raccoglitori marittimi (alto K per la ricchezza delle risorse costiere, basso r perché le risorse marine sostengono densità alte ma con dinamiche di crescita lente) invece che da cacciatori-raccoglitori terrestri (basso K, alto r), la velocità di avanzamento del fronte diminuisce e il vincolo su $T_{ingresso}$ si allenta leggermente — verso un ingresso ancora più antico. In nessuna combinazione di parametri plausibile

un ingresso a 13.500 anni cal BP riesce a produrre Monte Verde a 14.600 anni cal BP: il vincolo è robusto in tutto lo spazio dei parametri biologicamente ragionevoli.

Capitolo IV — Genetica delle popolazioni fondatrici: coalescenza, bottleneck, aplogruppi e paleogenomica delle prime Americhe

4.1 Premessa: i limiti epistemici dell'approccio genetico al problema del poblamento

La genetica molecolare delle popolazioni native americane è diventata, negli ultimi due decenni, uno dei principali terreni del dibattito sul popolamento delle Americhe, con la promessa — spesso sopravvalutata nella comunicazione pubblica e talvolta anche in quella scientifica — di risolvere le dispute che il record archeologi non riesce a chiudere. Prima di analizzarne i risultati nel dettaglio tecnico che meritano, è necessario stabilire con precisione i limiti epistemici di questo approccio. Questa premessa non è un esercizio di falsa modestia metodologica; è una precondizione per la lettura corretta dei dati, senza la quale ogni interpretazione rischia di attribuire alla genetica un peso risolutivo che essa non può avere, o al contrario di svalutarla come fonte di informazione indipendente sul passato demografico.

La genetica delle popolazioni può rispondere con relativa affidabilità a domande del tipo: *quando si separò la popolazione antenata dei Nativi Americani dalla sua popolazione di origine siberiana?* e *la popolazione fondatrice era una o più?* Può fornire stime della dimensione effettiva della popolazione fondatrice e della struttura filogeografica degli aplogruppi — il quale clade mitocondriale o cromosomale discende da quale sottogruppo della popolazione antenata, e come si distribuisce geograficamente questa discendenza. Può, attraverso il DNA antico, fornire accesso diretto alla variabilità genetica di individui preistorici e confrontarla con le popolazioni moderne e con la variabilità attesa sotto diversi modelli demografici.

Non può rispondere direttamente alla domanda: quando arrivarono fisicamente gli esseri umani nelle Americhe? La differenza tra questa domanda e la precedente è cruciale. La separazione genetica — la divergenza delle linee genealogiche — può precedere l'evento fisico dell'attraversamento della Beringia di migliaia di anni, se la popolazione antenata si isolò geograficamente prima di migrare. Ed è esattamente questa la previsione del modello del "Beringian Standstill": il tempo di separazione genetica ($T_{sep} \approx$ 22.000–25.000 anni cal BP) precede il tempo di colonizzazione fisica ($T_{c} \approx$ 15.500–18.000 anni cal BP) di ca. 7.000–9.000 anni, perché nel periodo intermedio la

popolazione antenata era fisicamente in Beringia, geneticamente isolata dalla Siberia, ma non ancora nelle Americhe.

E la presenza fisica di esseri umani in America — la domanda archeologi — può non lasciare alcuna traccia genetica nelle popolazioni moderne se quei gruppi si estinsero senza discendenza. Come argomentato nella §1.3.2 dell'Introduzione usando la teoria dei processi di Galton-Watson, la probabilità di estinzione di una linea fondata da un piccolo gruppo è non trascurabile anche con tassi di crescita demografica positivi. Questo crea la possibilità strutturale di popolazioni preistoriche "geneticamente invisibili" — presenti nel record archeologi (se le condizioni di preservazione sono favorevoli) ma assenti nel record genetico delle popolazioni moderne perché si estinsero prima di lasciare discendenza persistente.

Richiamare questa possibilità ogni volta che si discute dei rapporti tra evidenze genetiche e arqueologiche non è un argomento ad hoc per salvare le rivendicazioni pre-Clovis; è una conseguenza diretta della struttura probabilistica della demografia delle piccole popolazioni.

Con queste premesse esplicitate, l'analisi genetica è comunque straordinariamente informativa. Essa fornisce vincoli quantitativi precisi sulla struttura demografica della colonizzazione (numero di fondatori, tempo di isolamento, tasso di espansione), vincoli sulla struttura filogeografica delle rotte migratorie (gli aplotipi devono essere biogeograficamente coerenti con le rotte proposte), e — attraverso il DNA antico — un accesso diretto alla variabilità preistorica che permette di testare modelli demografici costruiti su popolazioni moderne.

4.2 La teoria della coalescenza: fondamenti e applicazione al problema americano

4.2.1 Principi fondamentali del modello coalescente

La teoria della coalescenza (coalescent theory), formulata da John Kingman nel 1982 in un articolo destinato a cambiare il panorama della genetica delle popolazioni, offre un framework matematico per descrivere la storia genealogica di un campione di geni in una popolazione: invece di seguire in avanti nel tempo la trasmissione degli alleli, segue a ritroso nel tempo il processo di "fusione" (coalescence) delle linee genealogiche dei geni campionati, fino al loro antenato comune più recente (MRCA, Most Recent Common Ancestor).

L'inversione del punto di vista — dal prospettico al retrospettivo — è non solo elegante matematicamente, ma produce risultati di grande potenza pratica: permette di

stimare i parametri demografici della popolazione dalla struttura genealogica del campione, senza dover osservare il processo evolutivo in tempo reale.

Il risultato fondamentale di Kingman è che in una popolazione di dimensione effettiva N_e diploide che evolve secondo il modello di Wright-Fisher (riproduzione casuale, generazioni discrete, assenza di selezione), la probabilità che due linee genealogiche coalescano in esattamente *k* generazioni nel passato è:

Il tempo di coalescenza T_{coal} *segue quindi, in modo approssimato, una distribuzione esponenziale con tasso* $1/(2N_e)$*, e il suo valore atteso è:*

Per un campione di *n* linee, il processo di coalescenza avviene a stadi: le *n* linee si riducono a *n-1* nel tempo T_n, poi a *n-2* nel tempo T_{n-1}, e così via. I tempi di coalescenza dei vari stadi sono indipendenti, e il tempo atteso per la transizione da *k* a *k-1* linee è $E[T_k] = 4N_e/[k(k-1)]$. Il tempo totale per raggiungere il MRCA è:

che cresce asintoticamente verso $4N_e$ per $n \to \infty$. Questa convergenza ha un'implicazione pratica fondamentale per lo studio del popolamento americano: campioni molto grandi di individui moderni aggiungono poco alla precisione della stima di T_{MRCA} — ciò che conta è la diversità genetica del campione (la struttura delle relazioni genealogiche), non il numero assoluto di individui. Un campione di 200 aplotipi informativi è quasi equivalente a un campione di 2.000 per la stima del MRCA, ma richiede mille volte meno risorse analitiche.

Questa è la ragione per cui i primi studi sulla genetica delle popolazioni native americane, condotti su campioni piccoli ma con aplotipi informativi (mtDNA), producevano stime demografiche già ragionevolmente precise. #### 4.2.2 Il modello di isolamento-migrazione (IM): struttura formale e applicazione Quando due popolazioni si separano al tempo T nel passato, le linee genealogiche di geni campionati dalle due popolazioni non possono coalescere nel periodo successivo alla separazione (se non c'è migrazione), ma solo nel periodo precedente alla separazione, quando appartenevano alla popolazione antenata comune.

Questo produce un segnale genetico diagnostico: il tempo di coalescenza atteso per linee campionate dalle due popolazioni discendenti è maggiore del tempo di coalescenza atteso per linee campionate dalla stessa popolazione, proporzionalmente alla dimensione della popolazione antenata $N_{e,A}$ e al tempo di divergenza T:

La stima di T dal tempo di coalescenza osservato richiede una stima indipendente di $N_{e,A}$ — una quantità non osservabile che viene stimata

congiuntamente con T nel framework bayesiano. Il modello di isolamento-migrazione (IM, Nielsen e Wakeley 2001; Hey e Nielsen 2007) formalizza questo problema aggiungendo al modello la possibilità di gene flow tra le popolazioni dopo la separazione, producendo un sistema di sei parametri liberi: $\theta = \left(N_1, N_2, N_A, m_1, m_2, T\right)$, stimati simultaneamente da dati multilocus attraverso MCMC.

Applicato alle coppie di popolazioni siberiane orientali (principalmente Even, Koryak, Chukchi) e ai Nativi Americani (campioni di gruppi Cree, Ojibwa, Maya, Ticuna), il modello IM produce stime dei parametri chiave che sono notevolmente concordanti tra studi diversi con dati diversi (Schroeder et al. 2015; Raghavan et al. 2015; Moreno-Mayar et al. 2018): il tempo di separazione si concentra nell'intervallo 19.000–28.000 anni cal BP con mediana intorno a 22.500 anni; la dimensione effettiva della popolazione antenata in Beringia è stimata nell'intervallo 700–6.000 individui; il tasso di migrazione post-separazione (m_1, dalla Siberia verso le Americhe) è statisticamente non distinguibile da zero in quasi tutti gli studi, confermando il modello di un singolo evento fondatore senza gene flow continuativo.

La concordanza di questo quadro con il modello del Beringian Standstill — che prevede esattamente un periodo di isolamento della popolazione fondatrice (nessun gene flow da $m_1 \approx 0$) di durata compatibile con la differenza tra T_{sep} e T_c — è notevole e costituisce uno dei supporti genetici più solidi per quel modello.

4.2.3 Il tasso di mutazione del mtDNA e la sua dipendenza dalla scala temporale

Una fonte di incertezza sistematica nelle stime dei tempi di coalescenza mitocondriale è il tasso di mutazione del DNA mitocondriale, che non è una costante biologica ma dipende dalla scala temporale considerata. Questo problema ha una storia complessa che merita di essere esposta con cura, perché produce confusioni significative nella letteratura sul popolamento americano.

Il "tasso filogenetico" (μ_{phy}) è stimato dalla divergenza tra specie con date di separazione fossile indipendentemente note. Per il mtDNA umano, la calibrazione classica di Vigilant et al. (1991) e di Hasegawa et al. (1993) produce $\mu_{phy} \approx 1,1 \times 10^{-8}$ sostituzioni per sito per anno per l'intera regione codificante. Questo tasso produce, per la divergenza tra le popolazioni native americane e le loro controparti siberiane più vicine, stime di separazione nell'intervallo 30.000–40.000 anni — più antiche di quelle del modello IM.

Il "tasso genealogico" o "pedigree rate" (μ_{ped}), invece, è stimato dall'analisi di famiglie in cui le mutazioni del mtDNA possono essere osservate direttamente su una-due generazioni. Questi studi (Howell et al. 2003; Macaulay et al. 1997) producono tassi nell'intervallo $2{,}0–2{,}5 \times 10^{-8}$ per sito per anno — quasi il doppio del tasso filogenetico. Usando questo tasso, le stesse divergenze producono stime di separazione nell'intervallo 14.000–20.000 anni — più recenti e compatibili con un modello di colonizzazione tardiva.

La risoluzione di questo paradosso è stata proposta da Soares et al. (2009, American Journal of Human Genetics: "Correcting for Purifying Selection: An Improved Human Mitochondrial Molecular Clock"), che mostrano che la discrepanza tra i due tassi riflette una differenza nella composizione mutazionale: le mutazioni che vengono rilevate sul breve periodo genealogico includono una proporzione elevata di mutazioni destinate a essere eliminate dalla selezione purificante su scale temporali evolutive più lunghe (transient polymorphisms), le quali si accumulano alla velocità del tasso di mutazione ma vengono poi rimosse prima di fissarsi.

Il tasso filogenetico misura solo le mutazioni che sopravvivono alla selezione (mutazioni neutrali fissate), mentre il tasso pedigree misura l'intero flusso mutazionale incluse le transienti. Per scale temporali dell'ordine di 10.000–25.000 anni — rilevanti per il problema pre-Clovis — la stima appropriata è il "tasso quasi-filogenetico" corretto per la selezione purificante, stimato da Soares et al. in $\mu_{qp} \approx 1{,}55–1{,}70 \times 10^{-8}$ per sito per anno. Con questo tasso, le stime di separazione convergono sull'intervallo 20.000–27.000 anni cal BP — perfettamente coerente con le stime del modello IM.

Questa soluzione tecnica al paradosso dei tassi ha una conseguenza metodologica importante: studi che usano il tasso pedigree per stimare tempi di separazione delle popolazioni native americane producono sistematicamente stime troppo recenti, e studi che usano il tasso filogenetico producono sistematicamente stime troppo antiche. La valutazione critica della letteratura sul timing del popolamento richiede di verificare quale tasso è stato usato in ciascuno studio, e di correggere mentalmente le stime di conseguenza.

4.3 Gli aplogruppi fondatori: struttura, distribuzione e significato

4.3.1 I cinque aplogruppi mitocondriali e la loro filogeografia

Le popolazioni native americane appartengono a cinque aplogruppi mitocondriali principali: A2, B2, C1b, D1, e X2a (con sottocladi minori come C1c e C1d riconosciuti in studi recenti). Quattro di questi — A, B, C, D nella loro forma paraffiletica — sono distribuiti ampiamente in tutta l'Asia orientale e nel Nordest asiatico: le popolazioni

siberiane orientali (Even, Evenki, Yukagiri, Koryak, Chukchi) presentano tutti e quattro questi aplogruppi, confermando la derivazione genetica dei Nativi Americani da una popolazione di questa area geografica.

La distribuzione interna degli aplogruppi nelle Americhe è filogeograficamente strutturata: A2 è più frequente nelle popolazioni nordamericane artiche e subartiche; B2 è diffuso principalmente in Mesoamerica e nel Nordamerica occidentale; C1 e D1 sono distribuiti più uniformemente dal Nord al Sud; X2a è concentrato nei gruppi Algonchini del Nordest nordamericano.

La struttura filogeografica degli aplogruppi può essere usata per inferire il percorso della dispersione dalla testa di ponte fondatrice verso le diverse aree del continente. Se la colonizzazione avvenne da Nord-ovest verso Sud-est, ci si aspetta che le popolazioni nordoccidentali conservino la maggiore diversità interna agli aplogruppi — più aplotipi diversi, e aplotipi più vicini alla radice filogenetica dell'aplogruppo — mentre le popolazioni più meridionali mostrano riduzione della diversità dovuta a effetti fondatori successivi durante la dispersione.

Questo pattern — la cosiddetta "gradient hypothesis" — è osservato nei dati: Tamm et al. (2007) mostrano che la diversità nucleotidica intra-aplogruppo è significativamente più alta nelle popolazioni nordoccidentali americane (Athabascani, gruppi della Columbia Britannica) che nelle popolazioni sudamericane, con una diminuzione progressiva da Nord a Sud coerente con un modello di dispersione a tappe (serial founder effect). Ogni tappa di dispersione riduce la diversità per deriva, producendo un gradiente di diversità decrescente lungo la rotta di espansione.

Questo gradiente, però, non è lineare né privo di eccezioni, il che segnala la complessità demografica sottostante. Le popolazioni dell'Amazzonia meridionale e del Brasile centrale mostrano livelli di diversità mitocondriale relativamente alti — la cosiddetta "Amazonian diversity paradox" discussa da Hunley et al. (2008) — che non è facilmente spiegabile con un semplice modello di dispersione a tappe da Nord-ovest. Una spiegazione possibile è che le popolazioni amazzoniche siano il prodotto di miscelazione secondaria tra più linee di discendenza che raggiunsero il Sudamerica attraverso percorsi diversi — coerente con il modello della colonizzazione costiera che potrebbe aver prodotto più fronti di avanzamento convergenti verso il centro del continente.

4.3.2 Il problema di X2a: le origini di un aplogruppo misterioso

L'aplogruppo X2a occupa una posizione speciale nel dibattito genetico sul popolamento americano perché la sua distribuzione geografica non si inserisce in modo immediato nel quadro della migrazione beringiana. A differenza degli

aplogruppi A, B, C, D — presenti con frequenza apprezzabile nelle popolazioni siberiane orientali — l'aplogruppo X nel suo insieme ha una distribuzione geografica globale molto particolare: è raro o assente nelle popolazioni dell'Asia orientale e del Nordest asiatico (con frequenze inferiori all'1% nelle popolazioni chukcì, even, e siberian), ma è presente a frequenze moderate nel Vicino Oriente (fino al 25% in alcune popolazioni druze del Libano), nel Nordafrica (5–10%), nell'Europa meridionale (2–5%), e tra alcuni gruppi dei Nativi Americani del Nord America centrale (fino al 25% negli Ojibwa e nei Sioux occidentali).

Questa distribuzione "bimodale" — frequente nel Vicino Oriente e nelle Americhe, rara tra di esse — ha stimolato interpretazioni creative, inclusa l'ipotesi solutriana di Stanford e Bradley (2012), che propone una colonizzazione dell'America del Nord dall'Europa occidentale durante il LGM attraverso il ghiaccio atlantico.

L'analisi filogenetica dettagliata di X2a risolve questa questione in modo convincente. Reidla et al. (2003, American Journal of Human Genetics: "Origin and Diffusion of mtDNA Haplogroup X") hanno ricostruito la filogenesi mondiale di X, mostrando che X2a si trova nella filogenesi in posizione derivata rispetto alle popolazioni del Vicino Oriente — cioè condivide con loro un antenato comune molto più antico rispetto al periodo del LGM (nell'ordine di 20.000–30.000 anni), ma non deriva direttamente da esse attraverso una migrazione atlantica recente.

Perego et al. (2009, PLOS ONE: "Distinctive Paleo-Indian Migration Routes from Beringia Evidenced by Two Rare mtDNA Haplogroups") identificano nel Nordest asiatico (Mongolia, Altai) popolazioni con aplotipi X2 che si trovano nella filogenesi come gruppo fratello di X2a, suggerendo che l'antenato di X2a era presente nel continente asiatico e potrebbe aver raggiunto le Americhe attraverso la rotta beringiana, con successiva estinzione (o estrema rarefazione) dell'aplogruppo in Asia ma persistenza nelle Americhe a causa di effetti fondatori.

Questa interpretazione — che X2a giunse in America attraverso la stessa rotta beringiana degli altri aplogruppi, ma da una sorgente asiatica che non è più la popolazione siberiana orientale moderna — è la più parsimoniosa disponibile e non richiede rotte alternative. Il fatto che X2a sia concentrato nel Nordest nordamericano (non nel Nordovest, dove ci si aspetterebbe la massima frequenza se venisse dall'entrata beringiana di Alaska-British Columbia) può essere spiegato da successivi effetti fondatori durante la colonizzazione del Nord America o da processi di deriva differenziale nelle diverse aree del continente.

4.3.3 Il DNA autosomale e i marcatori SNP-genome-wide: una visione più completa

Il mtDNA e il cromosoma Y, pur essendo strumenti potenti per la ricostruzione filogenetica, offrono solo una visione parziale della storia demografica perché ciascuno trasmette la storia di una sola linea di discendenza — la linea materna e la linea paterna rispettivamente — su un totale di 2^n linee ancestrali dopo n generazioni. La visione completa della storia demografica di una popolazione richiede l'analisi dell'intero genoma, e in particolare dei marcatori autosomali che riflettono la storia di entrambe le linee di discendenza.

L'avvento dei chip di genotipizzazione ad alta densità (SNP arrays, 500.000–2.000.000 di marcatori per individuo) ha permesso, a partire dalla metà degli anni 2000, studi genome-wide sulle popolazioni native americane che forniscono stime più robuste dei parametri demografici rispetto ai soli marcatori uniparentali. La struttura dell'analisi si basa sulla correlazione tra loci distanti nel genoma (linkage disequilibrium decay): due marcatori lontani sono in linkage disequilibrium (LD) solo se la popolazione è di formazione recente, perché la ricombinazione progressivamente distrugge la correlazione iniziale con una velocità proporzionale alla distanza genetica.

La lunghezza dei blocchi di LD in una popolazione è quindi inversamente proporzionale all'età della popolazione — una "cronometria genetica" indipendente dal tasso di mutazione.

I dati genome-wide dei Nativi Americani (Raghavan et al. 2015; Skoglund et al. 2015; Pickrell et al. 2012) mostrano un LD significativamente più lungo rispetto alle popolazioni africane ed europee — coerente con un bottleneck severo di formazione recente — e una struttura di LD compatibile con una separazione dalla popolazione asiatica orientale nell'intervallo 18.000–26.000 anni cal BP, senza evidenze di un secondo evento fondatore maggiore nelle popolazioni nordamericane non-artiche dopo il primo. Questo supporta il modello della singola ondata fondatrice per i First Americans, con ulteriori contributi genetici molto più limitati nelle popolazioni artiche (Paleo-Eskimo e Neo-Eskimo) da migrazioni successive.

4.4 Il bottleneck fondatore: quantificazione formale delle perdite di diversità

4.4.1 Il modello di Nei-Maruyama-Chakraborty e la stima della severità del bottleneck

Un bottleneck demografico è un episodio in cui la dimensione della popolazione si riduce drasticamente per un periodo breve (in termini generazionali), seguito da una crescita rapida. In termini di teoria della coalescenza, un bottleneck produce una

compressione delle linee genealogiche nella fase di bassa N_e: le linee che sopravvivono al bottleneck tendono a coalescere durante o immediatamente prima di esso, producendo un "bus" filogenetico molto stretto — pochi rami con molte sequenze moderne che dipendono da ciascuno.

Il risultato osservabile è una riduzione della diversità genetica (eterozigosità, numero di alleli) rispetto alla popolazione pre-bottleneck, con una distribuzione delle frequenze alleliche sbilanciata verso alleli ad alta frequenza (gli alleli rari sono stati persi preferenzialmente durante il bottleneck).

Il modello formale di Nei, Maruyama e Chakraborty (1975, *Evolution*: "The bottleneck effect and genetic variability in populations") descrive l'evoluzione dell'eterozigosità attesa H durante e dopo un bottleneck. Se H_0 è l'eterozigosità pre-bottleneck, dopo τ generazioni di dimensione ridotta N_b e poi t generazioni di espansione a dimensione N_e:

Per $N_b = 1.500$ *individui,* $\tau = 250$ *generazioni (ca. 7.500 anni con generazione media di 30 anni), e* $N_e = 100.000$ *individui post-bottleneck con* $t = 500$ *generazioni, si ottiene:*

Una riduzione dell'eterozigosità dell'ordine dell'8–10% rispetto alla popolazione siberiana antenata. Questo è compatibile con le riduzioni osservate nei dati: le popolazioni native americane mostrano un'eterozigosità media dei microsatelliti del 22–35% inferiore rispetto alle popolazioni siberiane orientali — indicando che i parametri effettivi del bottleneck erano più severi di quelli usati in questo esempio (N_b più piccola o τ più lungo o entrambi).

Un metodo alternativo per stimare la severità del bottleneck è l'analisi della mismatch distribution — la distribuzione del numero di differenze tra coppie di aplotipi scelti casualmente nel campione. Sotto un'espansione rapida da un'unica popolazione fondatrice, la mismatch distribution ha una forma unimodale con picco in una posizione proporzionale all'espansione demografica (τ_{exp}) e larghezza proporzionale al numero di fondatori. I dati delle mismatch distribution per il mtDNA dei Nativi Americani (Fagundes et al. 2008) mostrano una forma unimodale con picco compreso nell'intervallo 10.000–20.000 anni, compatibile con un modello di espansione rapida ca. 15.000 anni fa da un piccolo numero di fondatori — coerente con il BIM ma compatibile anche con modelli di colonizzazione più recenti.

4.4.2 La struttura dell'F_{ST} e la quantificazione della differenziazione genetica

Il parametro F_{ST} (Fixation Index) misura la proporzione della variazione genetica totale che è attribuibile a differenze tra popolazioni piuttosto che

all'interno di esse. Valori di F_{ST} alti indicano forte differenziazione tra popolazioni (poco gene flow); valori bassi indicano scarsa differenziazione (molto gene flow o storia condivisa recente).

Per i loci autosomali, i valori di F_{ST} tra popolazioni native americane e siberiane orientali sono nell'intervallo *0,15–0,22* (Wang et al. 2007; Raghavan et al. 2015) — superiori ai valori tipici tra popolazioni europee (*0,03–0,08*) o asiatiche orientali (*0,05–0,12*), coerenti con un bottleneck severo e prolungato. Per il mtDNA, i valori di F_{ST}^{mtDNA} sono ancora più alti, nell'intervallo *0,40–0,55*, riflettendo la maggiore sensibilità del marcatore uniparentale (con $N_e^{mtDNA} = 1/4 \cdot N_e^{nucleare}$) ai processi di deriva genetica.

La struttura interna dell'F_{ST} tra popolazioni native americane — cioè quanto le popolazioni native americane differiscano tra loro — è informativa sulla struttura spaziale e temporale della colonizzazione. Un pattern in cui le popolazioni nordamericane differiscono tra loro meno di quanto differiscano dalle sudamericane è coerente con una dispersione più recente nel Nordamerica (forse da una testa di ponte beringiana) che ha avuto meno tempo per divergere; il pattern opposto potrebbe suggerire strutture di colonizzazione più complesse.

I dati attuali (Pickrell et al. 2012; Skoglund et al. 2015) mostrano una struttura gerarchica: le popolazioni native americane formano un clade genetico rispetto alle popolazioni asiatiche, con differenziazione interna moderata ($F_{ST}^{interno} \approx 0{,}05–0{,}15$) compatibile con ca. 12.000–15.000 anni di separazione tra le diverse aree geografiche dopo la colonizzazione.

4.5 Il DNA antico: accesso diretto alla preistoria demografica

4.5.1 Le sfide tecniche dell'aDNA e i progressi degli ultimi dieci anni

L'analisi del DNA antico (*ancient DNA*, aDNA) da resti preistorici americani ha trasformato il dibattito sul popolamento in modo tanto profondo quanto la paleogenomica delle popolazioni moderne — forse più profondo, perché permette di testare direttamente modelli demografici costruiti su popolazioni moderne contro la variabilità genetica di individui che vissero nelle epoche di interesse, eliminando la necessità di inferire il passato dall'osservazione del presente.

Le sfide tecniche dell'aDNA sono multiple e severe. Il DNA si degrada dopo la morte per idrolisi e ossidazione: le catene di DNA si frammentano in segmenti sempre

più corti con il tempo, e le basi subiscono modificazioni chimiche — in particolare la deamminazione delle citosine (C → U), che produce errori caratteristici di lettura (C letto come T in sequenziamento) che si concentrano alle estremità dei frammenti. Questo damage pattern (il profilo di deamminazione terminale) è sia una fonte di errore che un marcatore di autenticità: la presenza del profilo di deamminazione tipico del DNA antico — arricchimento di C→T alle estremità 5' e G→A alle estremità 3' — è la firma molecolare che distingue il DNA antico autentico dalla contaminazione moderna.

Campioni moderni contaminati non mostrano questo profilo; campioni antichi autentici lo mostrano con la frequenza attesa per la loro età.

Il sequenziamento di nuova generazione (NGS), disponibile commercialmente dalla metà degli anni 2000, ha rivoluzionato l'aDNA perché permette di sequenziare simultaneamente milioni di frammenti corti — compatibili con la lunghezza media dei frammenti di DNA antico (50–150 bp) — senza dover amplificare il DNA attraverso PCR con primer specifici. La PCR, che era la tecnologia standard per il sequenziamento di DNA antico fino al 2005, è vulnerabile all'amplificazione preferenziale di molecole di DNA moderna contaminante (più intere e più abbondanti delle molecole antiche frammentate); il NGS, campionando i frammenti in modo proporzionale alla loro abbondanza, riduce ma non elimina questo problema.

I campioni americani più adatti per il sequenziamento dell'aDNA sono quelli da ambienti freddi e aridi — permafrost e grotte ventilate — dove la degradazione termica del DNA è rallentata. I campioni sudamericani da ambienti tropicali hanno livelli di preservazione del DNA molto più bassi, il che spiega la distribuzione geograficamente asimmetrica dei successi di sequenziamento nel record americano: la maggioranza dei genomi antichi americani proviene da siti nordamericani o dalla Patagonia, non dall'Amazzonia o dal Brasile centrale dove le condizioni tropicali distruggono rapidamente il DNA.

4.5.2 I genomi chiave e le loro implicazioni

Il **genoma di Anzick-1** (Rasmussen et al. 2014, *Nature*) è il più antico genoma nativo americano sequenziato con copertura sufficiente per l'analisi demografica dettagliata. Proveniente da un bambino di ca. 12.600 anni da Wilsall, Montana, sepolto in associazione con manufatti Clovis (tra cui 125 oggetti litici rivestiti di ocra e 6 oggetti in avorio), il genoma di Anzick-1

fornisce il primo accesso diretto alla genetica di un individuo cronologicamente associato alla cultura Clovis.

Il risultato più sorprendente dell'analisi di Rasmussen et al. è che Anzick-1 è geneticamente più vicino alle popolazioni native americane moderne del Sud e Centro America che a quelle del Nord America — il che è inatteso se Clovis era il gruppo fondatore di tutti i Nativi Americani e se ci si aspetta che il genoma fondatore sia più simile ai gruppi nordamericani vicini al punto di ingresso beringiano. La spiegazione più parsimoniosa offerta da Rasmussen et al. è che Clovis non fu il progenitore diretto delle popolazioni nordamericane moderne, ma che le popolazioni nordamericane moderne discendono da una fonte distinta che arrivò dopo Clovis.

Questa interpretazione implica almeno due ondate di colonizzazione separate — Clovis e poi un gruppo distinto che divenne l'antenato delle popolazioni nordamericane moderne — o, in alternativa, che le popolazioni nordamericane moderne siano il prodotto di mescolanza di Clovis con popolazioni arrivate dopo.

Il genoma di Spirit Cave Man (Moreno-Mayar et al. 2018, Science) da ca. 10.600 anni fa in Nevada e il genoma di Kennewick Man (Rasmussen et al. 2015, Nature) da ca. 8.500 anni fa in Washington mostrano che questi individui con morfologia cranica "paleoamericana" (cranio lungo e stretto) appartengono geneticamente ai First Americans — confutando l'ipotesi che la morfologia cranica paleoamericana rifletta origini genetiche diverse dai Nativi Americani moderni. Questa confutazione risolve un dibattito decennale: la variazione morfologica cranica tra paleoamericani e nativi americani moderni non è evidenza di migrazioni multiple da sorgenti genetiche diverse, ma di diversificazione morfologica all'interno del pool genetico fondatore, probabilmente attraverso adattamento a diversi ambienti e diete e per deriva genetica.

I genomi di Lagoa Santa (Posth et al. 2018, Cell; Moreno-Mayar et al. 2018, Nature) da individui di ca. 10.000 anni del Brasile centrale mostrano la componente "Population Y" o "Ypykuéra" — un segnale genetico che mostra affinità con popolazioni dell'Asia del Sud e dell'Oceania e che è assente nei nativi nordamericani moderni e nella maggioranza dei nativi sudamericani. L'interpretazione di questa componente rimane apertamente dibattuta: Skoglund e Reich (2016, Nature: "A genomic view of the peopling of the Americas") propongono due modelli principali: una seconda migrazione dall'Asia orientale da una popolazione "australoasiatica" che era presente in Asia durante il Pleistocene superiore prima di essere sostituita dalle espansioni delle popolazioni mongoloidi moderne; oppure una componente di variabilità presente nella popolazione fondatrice originale e conservata nelle popolazioni sudamericane per isolamento, mentre si perdeva per deriva nelle nordamericane.

La distinzione tra queste ipotesi richiederebbe il sequenziamento di genomi di individui dell'intervallo 15.000–10.000 anni cal BP dal Sudamerica — un corpus attualmente quasi inesistente.

4.6 La struttura del Beringian Standstill: verifica formale e predizioni testabili

Il modello del Beringian Standstill (BIM, Tamm et al. 2007; Hoffecker et al. 2016) può essere formulato come un modello demografico parametrico a tre fasi la cui struttura formale è stata già presentata nel Capitolo originale. Qui si intende espandere la verifica delle predizioni del modello e discutere le sue vulnerabilità.

Il BIM fa predizioni specifiche su diversi tipi di evidenza che si estendono ben al di là dei dati genetici usati per costruirlo. La predizione più testabile attraverso la genetica è la struttura a stella della filogenesi mitocondriale americana: se tutti i Nativi Americani discendono da una singola popolazione fondatrice che si espanse rapidamente, la filogenesi degli aplogruppi americani dovrebbe mostrare una radiazione quasi simultanea di tutti i rami principali — le basi di A2, B2, C1, D1 e X2a dovrebbero essere datate a circa lo stesso periodo.

Questo è esattamente il pattern osservato: le date di divergenza basale di tutti e cinque gli aplogruppi americani cadono nell'intervallo 14.000–18.000 anni cal BP (con la correzione del tasso quasi-filogenetico di Soares et al. 2009), compatibile con una singola espansione da una testa di ponte fondatrice ca. 15.000–16.000 anni fa.

La predizione più controversa del BIM — quella che richiederebbe evidenze archeologi ancora non disponibili in forma robusta — è la presenza di siti occupazionali in Beringia nell'intervallo 25.000–15.000 anni cal BP. I siti disponibili (Bluefish Caves, nella sua parte canadese della Beringia, e Yana RHS in Siberia) sono numericamente insufficienti per documentare in modo soddisfacente una popolazione di 1.000–3.000 individui per 8.000 anni. Questo deficit documentario non falsifica il BIM — la detection probability per siti di quella densità demografica e di quella antichità è molto bassa, come argomentato nell'Introduzione — ma lo mantiene in uno stato di ipotesi plausibile e internamente coerente piuttosto che di fatto dimostrato.

4.7 Il cromosoma Y nelle popolazioni native americane: struttura, distribuzione e informazione demografica

4.7.1 L'asimmetria tra mtDNA e cromosoma Y nell'analisi delle popolazioni americane

L'analisi del cromosoma Y nelle popolazioni native americane è rimasta sistematicamente meno sviluppata rispetto all'analisi del DNA mitocondriale, per ragioni che combinano fattori tecnici e fattori storici della disciplina. Le ragioni tecniche includono la struttura del cromosoma Y — che ha un'alta proporzione di regioni ripetute e palindromiche che complicano il sequenziamento e l'analisi — e la minore variabilità nucleotidica della regione non ricombinante (NRY, *Non-Recombining Y*) rispetto al mtDNA nelle popolazioni con storia di bottleneck severo come le popolazioni native americane. Le ragioni storiche riflettono la priorità tradizionale della genetica delle popolazioni umane verso la discendenza matrilineare come tracciante preferenziale della storia demografica — una priorità che si giustifica parzialmente con la dimensione effettiva quattro volte inferiore del mtDNA rispetto al genoma nucleare, che lo rende più sensibile alla deriva genetica e quindi più informativo per la ricostruzione di eventi demografici come i bottleneck fondatori.

Queste ragioni non eliminano il valore del cromosoma Y come fonte di informazione complementare e parzialmente indipendente. Il cromosoma Y e il mtDNA tracciano rispettivamente la discendenza paterna e quella materna, e la loro concordanza o discordanza fornisce informazioni sulla struttura delle migrazioni — se gli uomini e le donne migrarono insieme o in pattern asimmetrici — e sulle dinamiche post-colonizzazione di selezione sessuale o di pratica matrimoniale esogamica. La discordanza tra i due marcatori, dove osservata, è spesso il segnale più informativo su fenomeni di gene flow locale, conquista, o asimmetria di genere nella colonizzazione. Nel caso delle Americhe, la concordanza tra la struttura degli aplogruppi mitocondriali e quella degli aplogruppi del cromosoma Y — entrambi coerenti con un evento fondatore singolo da una sorgente siberiana orientale — è essa stessa un dato positivo che rafforza il modello del Beringian Standstill: due marcatori indipendenti, con storie demografiche distinte, convergono sullo stesso quadro.

4.7.2 L'aplogruppo Q-M3: struttura filogenetica e distribuzione geografica

Il cromosoma Y delle popolazioni native americane è dominato quasi esclusivamente dall'aplogruppo **Q-M3** (equivalente a Q1b1a1a nella classificazione YCC più recente), definito dalla mutazione puntuale M3 che è praticamente assente nelle popolazioni dell'Eurasia orientale e praticamente fissa nelle popolazioni native americane non-artiche — con frequenze superiori al 90% nella grande maggioranza dei gruppi analizzati. Questa quasi-fissazione dell'aplogruppo Q-M3 è il segnale cromosomico Y più diretto di un bottleneck fondatore severo: tra tutti i cromosomi Y che i fondatori portavano, praticamente uno solo — quello dell'antenato del Q-M3 — ha lasciato discendenza nelle popolazioni native americane moderne.

La struttura filogenetica di Q-M3 è ora ben caratterizzata grazie all'analisi di sequenziamento completo del cromosoma Y (whole-Y sequencing) condotta da Karmin et al. (2015) e da Batini et al. (2017). Q-M3 si trova in posizione derivata rispetto all'aplogruppo Q-M242 (il ramo parent), che è distribuito nelle popolazioni siberiane — in particolare tra gli Ket del Siberia centrale e alcune popolazioni dell'Altai — e in alcune popolazioni dell'Asia centrale. L'antenato di Q-M3 era quindi presumibilmente presente nelle popolazioni del Nordest asiatico durante il Tardo Pleistocene, e la mutazione M3 avvenne in un individuo i cui discendenti colonizzarono le Americhe — un collo di bottiglia geneticamente estremo che si allinea perfettamente con il modello di una piccola popolazione fondatrice.

Il tempo di divergenza di Q-M3 dal suo clade sister siberiano, stimato con il tasso di mutazione dello Y calibrato su pedigree (Karmin et al. 2015: $\mu_Y \approx 0,76 \times 10^{-9}$ mutazioni per bp per anno per la regione NRY), produce una data di divergenza nell'intervallo 15.000–20.000 anni cal BP — coerente con la stima del tempo di separazione ottenuta dal mtDNA e dal DNA autosomale, e compatibile con il Beringian Standstill. La maggiore incertezza delle stime del cromosoma Y rispetto a quelle del mtDNA riflette la minore dimensione del database di varianti analizzate (il cromosoma Y ha meno varianti informatiche del mtDNA per le dimensioni del campione standard) — ma la concordanza nell'ordine di grandezza tra i due marcatori è uno dei test di consistenza più robusti disponibili.

La distribuzione geografica interna di Q-M3 nelle Americhe mostra una struttura filogeografica analoga a quella degli aplogruppi mitocondriali: maggiore diversità intra-aplogruppo nelle popolazioni nordamericane nordoccidentali, progressiva riduzione di diversità verso sud — un gradiente coerente con una dispersione via *serial founder effects* da una testa di ponte nordoccidentale. La sottostruttura di Q-M3 — i numerosi sub-aplogruppi definiti da mutazioni derivate rispetto a M3 — è distribuita geograficamente in modo non casuale, con alcuni sub-aplogruppi praticamente ristretti a singoli gruppi linguistici o geografici (un sub-aplogruppo specifico degli Athabascani nordamericani, un altro specifico dei gruppi andini), il che è coerente con la deriva genetica progressiva durante la dispersione e con l'isolamento geografico successivo di alcuni gruppi in vallate alpine o in isole.

4.7.3 L'aplogruppo C-M217 e le sue implicazioni per la struttura delle migrazioni

Una minoranza significativa delle popolazioni native americane — concentrata principalmente nei gruppi Na-Dené della costa nordoccidentale nordamericana e in alcune popolazioni della Great Plains — porta l'aplogruppo **C-M217** (equivalente a C2 nella classificazione moderna), che è il cromosoma Y dominante nelle popolazioni dell'Asia nordorientale (Mongoli, Manciù, gruppi della Siberia meridionale) e nelle

popolazioni dei nativi australiani (dove è presente nella forma C-M347, un sotto-clade distinto). La presenza di C-M217 nelle Americhe — a bassa frequenza (5–20%) in alcuni gruppi, assente nella grande maggioranza — ha generato due interpretazioni principali che hanno strutture demografiche molto diverse.

La prima interpretazione (Zegura et al. 2004; Karafet et al. 2008) considera C-M217 come parte del pool genetico della popolazione fondatrice originale — cioè il fondatore portava sia Q-M3 sia C-M217, e la quasi-estinzione di C-M217 nelle Americhe è il prodotto di deriva genetica durante la colonizzazione, con sopravvivenza in alcuni gruppi del Nord America per ragioni demografiche locali. Sotto questo modello, la variabilità del cromosoma Y americana riflette un singolo evento fondatore con modesta diversità interna, coerente con una popolazione fondatrice di qualche centinaio di individui.

La seconda interpretazione (Bolnick et al. 2006; Hammer et al. 2005) associa C-M217 a una seconda ondata migratoria distinta dalla prima — identificata con gli antenati dei gruppi Na-Dené (Athabascani, Eyak, Tlingit, e le lingue dene isolate come Navajo e Apache nel Sudovest nordamericano) — che raggiunse il Nordamerica in un momento successivo alla prima colonizzazione, portando con sé la lingua proto-Na-Dené e l'aplogruppo C-M217. Questa interpretazione è supportata dall'analisi linguistica di Greenberg et al. (1986), che raggruppava le lingue native americane in tre macro-famiglie (Amerind, Na-Dené, Eskimo-Aleut) correlate a tre ondate migratorie distinte — una classificazione molto controversa ma che trovava un certo supporto nei dati cromosomici Y.

La risoluzione della controversia richiede la sequenza di cromosomi Y antichi da individui dell'intervallo 15.000–8.000 anni cal BP distribuiti geograficamente nelle Americhe — un corpus che è ancora molto incompleto. I dati disponibili da Anzick-1 (cromosoma Y non sequenziabile per essere un bambino prepubere con materiale paleogenetico degradato), da alcuni individui degli strati profondi di On Your Knees Cave in Alaska, e da alcuni Paleoindiani del Brasile (con sequenziamento Y parziale in Posth et al. 2018) non permettono ancora di discriminare tra le due ipotesi con sufficiente potenza statistica. La questione rimane aperta, e con essa la questione del numero di migrazioni fondatrici — unitaria o plurale — nelle Americhe.

4.7.4 La statistica F del cromosoma Y e la sua interpretazione demografica

La struttura dell'F_{ST} per il cromosoma Y nelle popolazioni native americane mostra valori molto più alti di quelli del DNA autosomale: $F_{ST}^{Y} \approx 0,55–0,70$ *tra popolazioni geograficamente separate (Wang et al. 2007; Bortolini et al. 2003), rispetto a* $F_{ST}^{auto} \approx 0,05–0,15$. Questa differenza ha una spiegazione demografica precisa: il cromosoma Y ha una dimensione effettiva

pari a *1/4* di quella del genoma autosomale diploide ($N_e^Y = N_e/4$ in una popolazione con sex ratio uguale), il che significa che accumula deriva genetica quattro volte più velocemente dell'autosoma. Per una stessa storia demografica di bottleneck e dispersione, la differenziazione del cromosoma Y è quindi attesa essere molto più alta di quella dell'autosoma — e il rapporto osservato ($F_{ST}^Y / F_{ST}^{auto} \approx 4$–6) è coerente con l'atteso teorico per una storia demografica del tipo del Beringian Standstill.

Questo risultato ha un'implicazione metodologica importante per il dibattito pre-Clovis: la quasi-fissazione di Q-M3 nelle Americhe non è evidenza di un bottleneck particolarmente estremo rispetto a quello inferito dal mtDNA e dal DNA autosomale, ma è semplicemente il prodotto atteso della deriva genetica più rapida del cromosoma Y per la sua dimensione effettiva ridotta. I modelli che invocavano la distribuzione del cromosoma Y come evidenza di un bottleneck più severo di quello stimato dalle altre fonti genetiche commettevano quindi un errore di normalizzazione — non tenendo conto del fattore 4 di amplificazione della deriva nel cromosoma Y.

4.8 Upward Sun River e la complessità del record genetico della Beringia

4.8.1 Il sito e il contesto paleogenetico

Upward Sun River — denominato Xaasaa Na' in língua Koyukon Athabascano, il nome tradizionale del luogo — è un sito di insediamento in Alaska centrale (64°N) scavato da Ben Potter e collaboratori a partire dal 2006. Il sito è una buca di abitazione del Tardo Pleistocene-inizio Olocene, databili nell'intervallo 11.500–9.500 cal BP, che ha prodotto una sequenza di occupazioni multiple con resti di fauna, manufatti litici, e — crucialmente per la paleogenomica — resti scheletrici ben preservati di individui umani in condizioni di sepoltura intenzionale.

Il corpus genetico di Upward Sun River è stato analizzato da Moreno-Mayar et al. (2018, *Nature*: "Terminal Pleistocene Alaskan genome reveals first founding population of Native Americans"), che hanno sequenziato il genoma di un infante di ca. 11.500 anni con copertura sufficiente per l'analisi demografica completa. Il risultato centrale è di straordinaria importanza per il modello del Beringian Standstill: il genoma di Upward Sun River appartiene a una popolazione — denominata "Ancient Beringians" o "AB" — che è geneticamente distinta sia dai First Americans (i progenitori della grande maggioranza dei Nativi Americani) sia dai gruppi Na-Dené, e che rappresenta un ramo basale dell'albero genealogico della colonizzazione americana che si separò dai First Americans *prima* che questi si espandessero verso sud nelle Americhe.

4.8.2 Il modello demografico degli Ancient Beringians e la sua implicazione per il timing

Il modello demografico che emerge dall'analisi del genoma di Upward Sun River ha una struttura a tre fasi che può essere formalizzata come segue. In una prima fase (ca. 22.000–18.000 anni cal BP), la popolazione antenata comune di tutti i Nativi Americani si isolò in Beringia dal pool siberiano — questo è il Beringian Standstill già discusso nella sezione 4.6. In una seconda fase (ca. 17.500–15.000 anni cal BP), la popolazione beringiana si divise in due rami: il ramo degli Ancient Beringians, che rimase in Beringia e nella Beringia orientale (Alaska), e il ramo dei First Americans, che si espanse verso sud nelle Americhe. In una terza fase (ca. 8.000–6.000 anni cal BP), gli Ancient Beringians furono sostituiti o assorbiti in Alaska dagli antenati delle popolazioni Na-Dené, lasciando come unico vestigio nei genomi moderni alcune tracce di introgressione nelle popolazioni Athabascane della regione.

Questo modello ha conseguenze dirette per la struttura del dibattito pre-Clovis. La divisione tra Ancient Beringians e First Americans ca. 17.500–15.000 anni cal BP implica che la popolazione antenata comune dovette essere fisicamente presente in Beringia (o nelle sue immediate adiacenze) per almeno qualche millennio prima di questa divisione — esattamente come il Beringian Standstill predice. Questo fornisce un vincolo inferiore sul tempo di colonizzazione della Beringia: se la divisione avvenne a ca. 17.500 anni cal BP, e se la divisione richiese un periodo di co-residenza della stessa popolazione prima della separazione geografica (che è la condizione necessaria per la derivazione di un ramo da un antenato comune), allora la popolazione antenata dovette essere presente in Beringia almeno qualche centinaio di anni prima — un vincolo coerente con le stime del Beringian Standstill che collocano l'arrivo in Beringia ca. 22.000–25.000 anni cal BP.

La scoperta degli Ancient Beringians è anche rilevante per il dibattito sulla diversità morfologica paleoamericana. Se il pool genetico beringiano si divise ca. 17.000 anni fa in almeno due rami, e se i due rami colonizzarono aree diverse (Alaska per gli Ancient Beringians, il resto delle Americhe per i First Americans), i due gruppi avrebbero avuto ca. 6.000–7.000 anni di separazione prima dei contatti europei — sufficiente per accumulare differenze morfologiche per deriva genetica e adattamento locale, anche partendo dallo stesso pool fondatore. Questo fornisce un'alternativa demograficamente realistica all'ipotesi che la diversità morfologica paleoamericana rifletta origini genetiche radicalmente diverse.

4.8.3 Il genoma di On Your Knees Cave: conferma e complicazione

Il genoma di un individuo di ca. 10.300 anni da On Your Knees Cave (Prince of Wales Island, Alaska sudorientale), pubblicato da Lell et al. (1997) per il mtDNA e poi parzialmente rianalizzato per il DNA nucleare da Rasmussen et al. (2015), mostra un profilo genetico appartenente alla discendenza dei First Americans — non degli

Ancient Beringians — nonostante la sua posizione geografica in Alaska. Questo risultato è coerente con il modello degli Ancient Beringians solo se si assume che la suddivisione geografica tra le due popolazioni non fosse assoluta: i First Americans erano già espansi verso sud, ma alcuni gruppi potrebbero essere rimasti o essere tornati nella regione costiera dell'Alaska sudorientale attraverso la rotta costiera, creando una situazione di coesistenza geografica parziale tra i due rami nel primo Olocene. La coesistenza di Ancient Beringians (in Alaska interna) e First Americans (sulla costa dell'Alaska sudorientale) ca. 10.000–11.000 anni fa è geneticamente documentata e aggiunge un livello di complessità demografica al quadro del popolamento che i modelli a singola ondata migratoria semplificata non catturano.

4.9 Sintesi bayesiana delle evidenze genetiche: costruzione formale della likelihood

4.9.1 La likelihood genetica per il tempo di colonizzazione

Il Capitolo VI della monografia costruisce la distribuzione posteriore $P\left(T_c|D\right)$ sul tempo di colonizzazione T_c combinando evidenze arqueologiche, paleoecologiche e genetiche. Qui si sviluppa formalmente la componente genetica della likelihood — $L_{gen}\left(T_c\right) = P\left(D_{gen}|T_c\right)$ — che era stata descritta qualitativamente nella sezione §6.2.2 senza derivazione esplicita.

La likelihood genetica è la probabilità dei dati genetici osservati (struttura degli aplogruppi, tempo di coalescenza, F_{ST}, struttura del LD) dato il tempo di colonizzazione T_c. La sua struttura dipende dal modello demografico scelto. Nel framework del Beringian Standstill con singola ondata fondatrice, il modello ha quattro parametri liberi: il tempo di ingresso in Beringia T_{ber}, la dimensione effettiva della popolazione beringiana N_{ber}, il tempo di espansione nelle Americhe T_c, e il tasso di crescita post-espansione r. La likelihood è:

dove g_l è il dato genetico al locus l e il prodotto è su tutti i loci analizzati. Per i loci di mtDNA e cromosoma Y, $P\left(g_l|\cdot\right)$ è calcolabile attraverso la teoria della coalescenza nel framework IM (sezione 4.2.2); per i loci autosomali, si usa il modello di LD decay con la formula di Hill-Robertson per la decoposizione del LD in funzione del tempo di espansione.

La marginalizzazione su T_{ber} e N_{ber} con la loro distribuzione a priori produce la likelihood marginale su T_c:

Questa integral è computazionalmente intractable in forma chiusa, ma può essere approssimata attraverso integrazione numerica MCMC con un sampler

Metropolis-Hastings sulla spazio congiunto dei parametri. Le stime pubblicate da Moreno-Mayar et al. (2018) e da Raghavan et al. (2015), calibrate con il tasso quasi-filogenetico di Soares et al. (2009) per il mtDNA e il tasso whole-Y di Karmin et al. (2015) per il cromosoma Y, producono una likelihood marginale $L_{gen}(T_c)$ che è approssimativamente gaussiana con:

con $\mu_{gen} \approx 16.200$ anni cal BP e $\sigma_{gen} \approx 2.400$ anni — una distribuzione centrata su valori circa 2.000 anni più antichi di Monte Verde e 1.000 anni più recenti di Cooper's Ferry, con una larghezza che riflette l'incertezza combinata del tasso di mutazione e della struttura demografica del modello.

4.9.2 La combinazione con la likelihood archaeologica

La likelihood genetica può essere combinata con la likelihood archeologi $L_{arch}(T_c)$ — costruita a partire dalla distribuzione delle date dei siti pre-Clovis accettati pesate per le rispettive likelihood ratio (sezione §6.2.1) — attraverso il teorema di Bayes:

dove $L_{paleo}(T_c)$ è la likelihood paleoecologica — la probabilità che le rotte di accesso fossero aperte e ecologicamente percorribili al tempo T_c — e $\pi(T_c)$ è la prior. La forma esplicita di L_{paleo} può essere costruita dai dati paleoglaciologici come una funzione a gradino smussata: quasi zero per $T_c > 22.000$ anni (rotta costiera ancora bloccata dal ghiaccio Cordillerano nelle sue fasi di massima espansione), crescente tra 22.000 e 17.000 anni (progressiva deglacializzazione della costa), e praticamente costante dopo 17.000 anni (costa percorribile in condizioni analoghi alle attuali).

La distribuzione posteriore congiunta che emerge dalla combinazione delle tre likelihood ha una forma asimmetrica con coda destra lunga, con la moda intorno a ca. 17.500 anni cal BP — coerente con il timing del Beringian Standstill — e con massa posteriore non trascurabile (ca. 15–20%) per valori fino a ca. 22.000 anni, corrispondente agli scenari in cui la colonizzazione iniziò nel periodo di transizione prima dell'apertura completa della costa. Questo risultato è più preciso e meglio motivato della distribuzione qualitativa della sezione §6.2.1, e costituisce la stima più robusta del tempo di colonizzazione ottenibile con i dati attualmente disponibili.

4.9.3 Le vulnerabilità del modello e le direzioni di miglioramento

La principale vulnerabilità del modello bayesiano combinato risiede nella assunzione di indipendenza condizionale tra le likelihood archeologica e genetica dato T_c. Questa assunzione è violata se le evidenze archeologiche e quelle genetiche condividono errori sistematici comuni — per esempio, se sia le date dei siti sia le stime genetiche del tempo di separazione sono sistematicamente abbassate da contaminazione moderna. Non esiste un modo semplice di escludere questa possibilità, ma la diversità dei tipi di

errore potenziale nelle due linee di evidenza (contaminazione chimica per i campioni da datare, errori nel tasso di mutazione per le stime genetiche) rende molto improbabile che i bias siano correlati nel segno e nell'entità richiesta per spiegare la concordanza osservata.

Un secondo limite è la modellizzazione della prior $\pi(T_c)$. La prior usata nel Capitolo VI è una distribuzione uniforme su un intervallo [11.000, 40.000] anni cal BP — una scelta conservativa che non riflette le informazioni disponibili sui tempi di colonizzazione della Beringia dalla Siberia (che forniscono un vincolo superiore informativo su T_c) né le informazioni sulle capacità tecnologiche dei gruppi siberiani del Paleolitico superiore (che forniscono un vincolo inferiore sulla plausibilità di migrazioni molto antiche). L'uso di una prior informativa costruita dai dati siberiani — per esempio, una prior che assegna probabilità zero a $T_c < 14.000$ anni (perché Monte Verde è già accettato) e crescente con T_c fino a ca. 22.000 anni (compatibilità con il Yana RHS siberiano e con il BIM) — produrrebbe una distribuzione posteriore spostata verso valori più antichi rispetto alla prior uniforme, senza alterare la struttura qualitativa dei risultati.

Le direzioni di miglioramento più promettenti sono tre. La prima è l'inclusione nella likelihood genetica del segnale degli Ancient Beringians (sezione 4.8.2), che fornisce un vincolo aggiuntivo sulla divisione della popolazione fondatrice non ancora incorporato nelle stime pubblicate. La seconda è lo sviluppo di modelli di LD decay anisotropo — che trattano diversamente il LD su cromosomi diversi e a distanze genetiche diverse — per estrarre informazione demografica più fine dalla struttura del genoma autosomale. La terza, e di gran lunga la più impattante, è l'aggiunta di genomi antichi dall'intervallo 15.000–12.000 anni cal BP del Sudamerica, che eliminerebbero la necessità di inferire la struttura genetica delle prime popolazioni americane dalle sole popolazioni moderne e dai pochi individui antichi attualmente disponibili.

Capitolo V — Epistemologia del conservatorismo paradigmatico: struttura formale della resistenza, della revisione e dell'asimmetria istituzionale

5.1 Dalla fenomenologia alla struttura: il problema epistemologico del conservatorismo scientifico

Il termine "conservatorismo paradigmatico" è spesso usato in modo vago, come etichetta polemica rivolta da chi sostiene posizioni eterodosse contro chi le respinge. Questa monografia intende usarlo in senso tecnico preciso, distinguendo tre forme di conservatorismo che hanno strutture epistemiche molto diverse e che il dibattito americanista tende a trattare come un fenomeno unitario quando sono, in realtà, logicamente distinti.

Il conservatorismo epistemicamente razionale è il rifiuto di abbandonare un'ipotesi consolidata di fronte a un'evidenza anomala debole. Esso è il prodotto diretto della struttura bayesiana del ragionamento scientifico: quando la probabilità a priori di un'ipotesi è alta (perché è supportata da molte evidenze precedenti e da un sistema teorico coerente) e la likelihood ratio dell'evidenza anomala è vicina a 1 (perché l'evidenza è compatibile tanto con l'ipotesi quanto con la sua negazione), la revisione bayesiana produce una variazione molto piccola della probabilità a posteriori.

Rifiutare l'evidenza anomala debole è, in questo caso, razionalmente giustificato: è il problema delle infinite anomalie che ogni teoria deve ignorare per poter fare scienza, non perché le anomalie non abbiano contenuto, ma perché il loro contenuto informativo è insufficiente per superare il peso cumulativo delle evidenze a supporto della teoria.

Il **conservatorismo istituzionalmente motivato** è il rifiuto di revisione che è funzione non del contenuto epistemico dell'evidenza ma degli incentivi istituzionali dei ricercatori: la difesa di posizioni acquisite, la protezione delle proprie pubblicazioni precedenti, il controllo dell'accesso ai canali di pubblicazione e finanziamento. Questo tipo di conservatorismo non ha giustificazione epistemica ma ha una spiegazione sociologica: è il comportamento atteso di agenti razionali in un sistema di incentivi che premia la notorietà pre-esistente piuttosto che la correttezza epistemica.

Il **conservatorismo metodologicamente fondato** è il rifiuto di una revisione specifica basato su obiezioni tecniche valide alle evidenze proposte — obiezioni al pretrattamento dei campioni, alla qualità stratigrafica, alla natura

antropogenica degli oggetti. Questo tipo di conservatorismo è epistemicamente legittimo quando le obiezioni sono specifiche e documentate, ma diventa problematico quando le stesse obiezioni non vengono poste ai siti compatibili con il paradigma dominante — quando, cioè, il suo esercizio è asimmetrico.

Il dibattito pre-Clovis americanista presenta esempi chiari di tutte e tre le forme, spesso mescolate in modo inestricabile nelle stesse posizioni degli stessi ricercatori. La storia intellettuale del campo dalla metà degli anni Ottanta a oggi è in gran parte la storia di come queste tre forme di conservatorismo si siano combinate e si siano progressivamente disarticolate — con il conservatorismo istituzionalmente motivato che si è indebolito dopo Monte Verde, il conservatorismo metodologicamente fondato che si è raffinato grazie al miglioramento degli standard analitici, e il conservatorismo epistemicamente razionale che si è ricalibrato sulla base della distribuzione delle LR dei siti accettati.

5.2 Il paradigma Clovis First come programma di ricerca lakatasiano: struttura e degenerescenza

5.2.1 Il nucleo duro e la cintura protettiva

Imre Lakatos, nella *Methodology of Scientific Research Programmes* (1978), distingueva due componenti strutturali in ogni programma di ricerca scientifico maturo. Il **nucleo duro** (*hard core*) è l'insieme delle ipotesi teoriche fondamentali che i ricercatori si impegnano, per convenzione metodologica, a non abbandonare di fronte all'evidenza avversa. Il nucleo duro è "irrefutabile per decisione metodologica": quando l'esperimento sembra contraddirlo, si protegge modificando le ipotesi ausiliarie che lo circondano — la **cintura protettiva** (*protective belt*). La cintura protettiva è l'insieme delle ipotesi aggiuntive che congiungono il nucleo duro al livello osservativo, e che possono essere modificate in risposta all'evidenza per salvare il nucleo duro da falsificazione.

La valutazione di un programma si basa sulla sua traiettoria: un programma è **progressivo** se le successive modificazioni della cintura protettiva anticipano correttamente nuovi fatti prima che vengano osservati (il che è evidenza che il nucleo duro ha contenuto veritiero). Un programma è **degenerante** se le modificazioni della cintura protettiva servono esclusivamente a spiegare fatti

già osservati che contraddicono il nucleo duro, senza produrre nuove predizioni testabili.

Nel caso del paradigma Clovis First, il nucleo duro era composto da tre proposizioni strettamente interconnesse:

HC_1 (*Hard Core 1*): *Gli esseri umani non erano presenti nelle Americhe prima di ca. 13.500 anni cal BP.* Questa proposizione era la più vulnerabile empiricamente — il singolo sito autentico con data precedente è sufficiente per falsificarla — ma era protetta da una cintura che la rendeva difficilmente aggredibile con singole evidenze.

HC_2: *I produttori della cultura Clovis erano i primi americani, e tutte le successive culture paleolindiane discendono, direttamente o indirettamente, dalla tradizione tecnologica Clovis.* Questa proposizione aveva il vantaggio di essere sostenuta dall'eleganza del modello di Martin — un unico gruppo di fondatori, una singola tecnologia, un singolo momento di arrivo — e dalla relativa semplicità della transizione Clovis→post-Clovis documentata nel record stratigrafico nordamericano.

HC_3: *L'ingresso nelle Americhe avvenne attraverso il corridoio ice-free beringiano su via terrestre, ca. 13.500 anni cal BP.* Questa proposizione era la più vulnerabile rispetto alle evidenze paleoglaciologiche — dato che il corridoio era probabilmente chiuso o ecologicamente inabitabile in quella data, come discusso nel Capitolo III — ma fu protetta per decenni dall'assenza di alternative concretamente documentate.

La cintura protettiva si articolava in almeno quattro lemmi principali:

AB_1 (*Auxiliary Belt 1*): *In assenza di manufatti diagnosticamente riconoscibili (punte bifacciali con scanalatura basale, lame prismatiche), gli oggetti litici in contesti profondi sono da presumere geofatti fino a prova contraria.* Questo lemma aveva il vantaggio di essere formulato in termini di presunzione — il che significa che non richiedeva una confutazione positiva dei geofatti, ma solo l'assenza di prove positive di manifattura. Era quindi non-falsificabile nella pratica.

AB_2: *Le date ^{14}C molto antiche su materiali organici in contesti stratificati sono, in assenza di prove specifiche del contrario, da presumere contaminate da carbonio fossile o da materiale intruso.* Anche questo lemma era formulato in termini di presunzione, producendo un'asimmetria in cui la contaminazione era la spiegazione di default piuttosto che l'ipotesi eccezionale da dimostrare.

AB_3: *L'assenza di siti chiaramente pre-Clovis nelle aree nordamericane con la survey più sistematica è evidenza dell'assenza di occupazione pre-Clovis nell'intero emisfero.* Come argomentato nell'Introduzione, questo lemma tratta l'argomento ex silentio come se la detection probability fosse vicina a 1, quando è invece molto bassa.

AB_4: *La coerenza interna del modello Clovis First — la coincidenza tra timing dell'arrivo, pattern di distribuzione dei siti, e timing dell'estinzione della megafauna — è evidenza cumulativa della sua correttezza.* Questo lemma trasformava la coerenza interna del modello in evidenza positiva per le sue componenti, senza riconoscere che la coerenza interna è compatibile con un numero infinito di modelli alternativi.

5.2.2 Il momento di svolta come crisi selettiva della cintura protettiva

Il riconoscimento formale di Monte Verde nel 1997 costituisce, nell'analisi lakatasiana, non il crollo del paradigma ma la sua crisi selettiva: fu la cintura protettiva — in particolare i lemmi AB_1 e AB_2 — a essere abbandonata di fronte a MV-II, mentre il nucleo duro fu ridefinito in modo da assorbire l'anomalia riducendone la portata. HC_1 fu modificata da "non prima di 13.500" a "non molto prima di 15.000" anni, mantenendo la sua struttura di vincolo superiore sul timing della colonizzazione. HC_2 fu indebolita — Clovis non era più il primo, ma rimase il progenitore diretto di quasi tutte le popolazioni paleolindiane nordamericane.

HC_3 fu la più duramente colpita, perché Monte Verde richiedeva una rotta non-interna, ma fu salvata dalla vaghezza della sua formulazione: "la rotta passava per la Beringia" era compatibile sia con il corridoio interno sia con la rotta costiera.

Il punto critico dell'analisi lakatasiana è che la revisione del 1997 fu non-progressiva: non produsse nuove predizioni testabili sul tipo di siti pre-Clovis che ci si doveva aspettare, né un programma di ricerca positivo volto a identificarli e studiarli sistematicamente. La comunità americanista sembrò soddisfatta di aver risolto il problema di Monte Verde come caso speciale — un sito eccezionalmente ben conservato in una torbiera cilena, non necessariamente rappresentativo di una colonizzazione diffusa — e tornò alle pratiche della scienza normale.

Nessun panel di esperti fu organizzato per valutare sistematicamente gli altri siti pre-Clovis con gli stessi criteri applicati a Monte Verde. Nessun programma di ricerca fu lanciato per cercare sistematicamente siti comparabili alla "dimensione Monte Verde" nelle altre aree del continente. La revisione fu puntuale, non paradigmatica.

5.3 La struttura formale dell'asimmetria nel peso della prova

5.3.1 Formalizzazione della soglia di accettazione

La questione centrale dell'epistemologia del dibattito pre-Clovis è la legittimità dell'asimmetria nel trattamento delle evidenze. Il principio razionale che la sorregge — le ipotesi più straordinarie richiedono evidenze più straordinarie — ha una formulazione precisa nel framework bayesiano. Sia $\tau(T)$ la soglia di likelihood ratio richiesta per accettare come "dimostrata" la presenza umana in un sito di età T anni. Il principio di Sagan-Hume implica che τ sia una funzione strettamente crescente di T — maggiore l'antichità rivendicata, più alta la LR richiesta. Ma la forma funzionale di $\tau(T)$ deve essere specificata in modo indipendente dall'evidenza, non ricalibrata post hoc in risposta all'evidenza osservata.

La formulazione formale del principio è:

dove T_0 è un punto di riferimento (ad esempio, la data Clovis di 13.250 anni cal BP), τ_0 è la soglia applicata a un sito Clovis (la LR minima richiesta per accettare un sito come Clovis autentico), e ϕ è una funzione crescente con $\phi(1) = 1$ — la funzione di scaling del requisito evidenziale con l'antichità. Il dibattito pre-Clovis presenta due problemi distinti rispetto a questa formalizzazione. Il primo è che τ_0 — la soglia applicata ai siti Clovis — non è mai stata specificata esplicitamente.

Come Waters e Stafford (2007) documentano, molti siti Clovis accettati presentavano problemi di pretrattamento, di associazione stratigrafica, e di replicazione delle date analoghi o peggiori di quelli sollevati per i siti pre-Clovis. Questo suggerisce che $\tau_0^{Clovis} < \tau_0^{pre-Clovis}$: la soglia era implicitamente più bassa per i siti Clovis che per quelli pre-Clovis, indipendentemente dall'antichità rivendicata. Il secondo problema è che la funzione ϕ sembrava essere ricalibrata post hoc: ogni volta che un sito pre-Clovis accumulava evidenze sufficienti per superare la soglia implicita, la soglia veniva rivista verso l'alto attraverso la scoperta o l'enfatizzazione di nuove obiezioni.

Questo processo — non necessariamente consapevole o deliberato — produceva una soglia "mobile" che nessun sito poteva superare stabilmente, fino a quando Monte Verde non raggiunse un livello di documentazione così alto da rendere la soglia mobile epistemicamente indifendibile. #### 5.3.2 Il ruolo della struttura editoriale nella persistenza del paradigma La resistenza al pre-Clovis era amplificata e perpetuata dalla struttura del sistema editoriale delle riviste americaniste degli anni Ottanta-Novanta.

Le riviste principali del campo — *American Antiquity*, *Journal of World Prehistory*, *Quaternary Research* — erano dominate editorialmente da ricercatori

della tradizione Clovis First, non per cospirazione ma per la semplice ragione che i ricercatori Clovis First erano, numericamente, la maggioranza del campo e occupavano le posizioni editoriali in proporzione alla loro quota di ricercatori attivi. Il peer review, selezionando i valutatori dall'insieme degli specialisti del campo, produceva sistematicamente una prevalenza di valutatori con posizioni Clovis First per i manoscritti pre-Clovis.

Questo meccanismo — che è stato documentato con sufficiente specificità da Adovasio (2002, *The First Americans: In Pursuit of Archaeology's Greatest Mystery*) e da Guidon in interviste successive — non equivale a censura deliberata: la maggior parte delle obiezioni formulate dai valutatori erano scientificamente legittime, anche se asimmetricamente applicate. Ma produceva un effetto sistematico di innalzamento della soglia per i manoscritti pre-Clovis che i manoscritti Clovis-compatibili non incontravano: richieste di esperimenti aggiuntivi, di analisi supplementari, di cautele redazionali che raramente erano richieste con la stessa intensità per pubblicazioni che confermavano il paradigma.

La misura più diretta di questo effetto è la distribuzione geografica delle pubblicazioni pre-Clovis: i siti i cui proponenti erano ricercatori europei (Guidon per Pedra Furada) o sudamericani (Dillehay per Monte Verde, ma con affiliazione universitaria nordamericana) con accesso limitato alle reti editoriali anglosassoni tendevano a pubblicare in riviste nazionali o in lingue non-anglofone, riducendo la loro visibilità nel campo e il loro impatto sulla formazione del consenso. Questo non dice nulla sulla qualità delle evidenze — ma dice molto sulla struttura dei meccanismi di formazione del consenso. ### 5.4 Il confronto con le revisioni paradigmatiche analoghe: tre casi di studio #### 5.4.1 La deriva dei continenti (Wegener 1912–1965) Alfred Wegener propose la teoria della deriva dei continenti nel 1912 sulla base di evidenze convergenti di natura morfologica (la concordanza delle coste delle due sponde dell'Atlantico), geologica (la continuità delle formazioni rocciose tra Africa e Sudamerica), paleontologica (la distribuzione di fossilidi *Mesosaurus*, un rettile d'acqua dolce del Permiano, tra Sudamerica e Africa senza possibilità di attraversamento oceanico), e paleoclimatica (la presenza di depositi glaciali nelle regioni tropicali africane e di fossili di piante tropicali nelle isole Spitzbergen).

Le evidenze erano numerose, convergenti, e di qualità epistemica alta. La resistenza della comunità geologica durò cinquant'anni. Le obiezioni principali riguardavano non la qualità delle evidenze — che i critici in genere non contestavano nel merito — ma il meccanismo: la proposta di Wegener per la forza motrice della deriva (le forze centrifughe della rotazione terrestre, la maree gravitazionali lunari) era fisicamente impossibile su un ordine di grandezza di almeno tre-quattro ordini di grandezza.

Il meccanismo proposto non funzionava; di conseguenza, anche le evidenze a supporto erano trattate come coincidenze o come artefatti di processi alternativi non ancora identificati. La risposta standard era: *le evidenze sono interessanti ma il meccanismo è impossibile, quindi la teoria è sbagliata*. È esattamente lo stesso schema argomentativo usato nel dibattito pre-Clovis: *i manufatti sono interessanti ma non ci sono rotte percorribili a quella data, quindi la colonizzazione è impossibile*. La risoluzione arrivò dalla scoperta del meccanismo — l'espansione del fondo oceanico, documentata da Hess (1962) e da Vine e Matthews (1963) attraverso le anomalie magnetiche del fondo oceanico — non dalla rivalutazione delle evidenze di Wegener.

Questo è un punto metodologicamente cruciale: le evidenze di Wegener erano state corrette fin dal 1912; la rivoluzione paradigmatica richiedette la scoperta del meccanismo mancante. Nel dibattito pre-Clovis, i meccanismi sono disponibili — la rotta costiera del Pacifico è fisicamente plausibile, le imbarcazioni elementari documentate in Australia 65.000 anni fa rendono la navigazione costiera nel Pacifico nordorientale plausibile — ma non sono stati "scoperti" in modo abbastanza spettacolare da fungere da catalizzatori della revisione. #### 5.4.2 L'impatto del K-Pg (Alvarez 1980–1991) La proposta di Luis e Walter Alvarez (1980, *Science*) che l'estinzione al confine Cretaceo-Paleogene fosse stata causata dall'impatto di un meteorite di ca. 10 km di diametro si basava su un'evidenza chimica: l'arricchimento in iridio (un elemento raro nella crosta terrestre ma abbondante nei meteoriti) negli strati sedimentari al confine K-Pg in sei siti geograficamente distanti, con concentrazioni di 10–100 volte superiori al background della crosta.

L'ipotesi fu accettata con moderata resistenza iniziale e poi rapidamente consolidata nell'arco di un decennio, grazie alla scoperta del cratere di Chicxulub in Messico (1990) che fornì il "smoking gun" fisico dell'ipotetico impatto. Il caso Alvarez è istruttivo per il dibattito pre-Clovis per due ragioni. La prima è che la resistenza iniziale — basata sull'impossibilità di distinguere arricchimento meteoritico da anomalie vulcaniche e sull'insufficiente copertura geografica delle prime analisi — fu superata non da una singola evidenza devastante, ma dall'accumulo di evidenze convergenti di tipo diverso: iridio in 100+ siti, quarzo scioccato, sferule di vetro, datazione del cratere di Chicxulub coerente con il confine K-Pg.

Il pattern di convincimento — accumulo di LR da fonti indipendenti che la comunità alla fine non poté ignorare — è esattamente il pattern che il dibattito pre-Clovis sta seguendo, sia pure molto più lentamente. La seconda ragione è che la resistenza al caso Alvarez era epistemicamente più razionale di quella al pre-Clovis in un senso specifico: l'impatto meteoritico era genuinamente un'ipotesi straordinaria che richiedeva evidenze straordinarie, e la sequenza del convincimento — da pochi siti isolati con iridio anomalo a decine di siti con evidenze fisiche corroboranti — seguì

esattamente la struttura bayesiana attesa di un'evidenza che guadagna credibilità attraverso la corroborazione indipendente.

Il dibattito pre-Clovis ha avuto una struttura analoga, ma la resistenza istituzionale ha rallentato il processo di corroborazione bloccando l'accesso ai materiali e agli spazi di pubblicazione. #### 5.4.3 Boucher de Perthes e le industrie litiche del Diluvium (1840–1860) Il caso più antico — e strutturalmente più preciso come analogia per il pre-Clovis — è la storia del riconoscimento della grande antichità umana attraverso le industrie litiche del "Diluvium" (quello che oggi chiamiamo Pleistocene) nel Nordfrancia dell'Ottocento.

Jacques Boucher de Perthes scoprì e descrivì bifacciali acheuleani nelle ghiaie fluviali della Somme (Abbeville e Amiens) a partire dal 1838, pubblicando i risultati in tre volumi tra il 1847 e il 1864. La resistenza della comunità geologica e paleontologica francese e britannica durò oltre vent'anni: gli oggetti erano interpretati come geofatti ("thunderbolts" e "elfin-bolts" nella tradizione popolare, o prodotti di processi fisici naturali secondo i geologi accademici), le ghiaie erano interpretate come depositi alluviali recenti piuttosto che come formazioni del Diluvium antico, e le associazioni con faune estinte erano contestate come prodotto di rimescolamento.

La svolta avvenne nel 1859 — lo stesso anno di Darwin — quando John Evans e Joseph Prestwich visitarono Abbeville e Amiens e riconobbero pubblicamente l'autenticità dei manufatti e delle loro associazioni stratigrafiche. La comunità britannica accettò la grande antichità umana in pochi mesi, seguita dalla comunità francese. Il meccanismo della svolta fu l'autorevolezza dei visitatori esterni — non nuove evidenze materiali, che erano le stesse da vent'anni — e la coincidenza con il clima intellettuale darwiniano che rendeva l'antichità umana concettualmente assimilabile per la prima volta.

L'analogia con il dibattito pre-Clovis è precisa: le stesse evidenze (per Meadowcroft, per Pedra Furada nei livelli meno antichi) erano disponibili per decenni prima che fossero parzialmente riconosciute; il meccanismo della svolta non fu la scoperta di nuove evidenze decisive ma il cambiamento del contesto istituzionale — l'accumulo di consenso intorno a Monte Verde, che creò il precedente intellettuale necessario. Come la visita di Evans e Prestwich ad Abbeville rendeva l'accettazione delle industrie diluviane "consentita" dalla comunità britannica, il panel di Monte Verde del 1997 rendeva "consentita" dalla comunità americanista l'accettazione di altri siti pre-Clovis — non necessariamente approvata, ma non più automaticamente respinta. ---

Capitolo VI — Sintesi quantitativa bayesiana: integrazione delle evidenze e architettura della conoscenza residuale

La difficoltà principale non è tecnica — la disponibilità di strumenti MCMC sofisticati rende l'implementazione computazionale relativamente agevole — ma concettuale: definire in modo non arbitrario le distribuzioni di likelihood per le evidenze dei siti, e giustificare le scelte di prior in modo che riflettano credenze epistemiche pre-evidenza genuinamente indipendenti dai dati che si vogliono analizzare. Un secondo problema metodologico è l'indipendenza delle evidenze. Il teorema di Bayes nella sua forma standard assume che le evidenze dei diversi siti siano condizionalmente indipendenti dato il parametro di interesse T_c.

Questa assunzione è violata in almeno due modi che devono essere esplicitamente riconosciuti. Il primo è la dipendenza per le date: se i laboratori di datazione sistematicamente sottostimano le date antiche a causa di protocolli di pretrattamento inadeguati, tutti i siti con date contaminate avranno date sistematicamente più giovani del vero, producendo una correlazione positiva tra gli errori di tutti i siti con lo stesso tipo di problema di pretrattamento. Il secondo è la dipendenza per la valutazione dei manufatti: se i ricercatori che classificano gli oggetti come geofatti o manufatti condividono criteri formatisi nello stesso ambiente intellettuale (ad esempio, tutti formati nella tradizione Clovis First), le loro valutazioni potrebbero essere correlate non per le evidenze materiali ma per la struttura del loro schema classificatorio.

Il framework bayesiano gerarchico che si usa qui riconosce esplicitamente entrambe le fonti di dipendenza attraverso l'introduzione di parametri iperprior che regolano la correlazione tra le evidenze dei siti. ### 6.2 La distribuzione a posteriori del tempo di colonizzazione: risultati e interpretazione #### 6.2.1 Le probabilità posteriori di sintesi: un'interpretazione epistemica I risultati del modello bayesiano integrato — sia nella versione di Becerra-Valdivia e Higham (2020) sia nella formalizzazione proposta in questo lavoro — convergono su un quadro quantitativo abbastanza stabile nonostante le differenze metodologiche.

Riprendendo le probabilità posteriori di sintesi:

significa che la versione forte del paradigma Clovis First — nessuna presenza umana prima di 13.500 anni cal BP — è virtualmente falsificata dalle evidenze disponibili. Non statisticamente improbabile; virtualmente esclusa.

è la probabilità che la colonizzazione avvenne nell'intervallo immediatamente pre-Clovis, non molto prima di Monte Verde. Questo scenario — popolamento costiero rapido ca. 15.500–15.000 anni cal BP — è compatibile con i dati di Paisley e Monte Verde senza richiedere nulla di ulteriore. Ha il 15% della massa posteriore.

è il cuore della distribuzione: la maggior parte della massa posteriore (65%) cade nell'intervallo che include Bluefish Caves e Chiquihuite, ma esclude i siti più antichi. Questo è lo scenario del "Beringian Standstill" nella sua versione più documentata: una colonizzazione iniziata ca. 16.000–22.000 anni cal BP, con le prime popolazioni ancora in Beringia (Bluefish) o ai margini meridionali del ghiacciaio (se Chiquihuite è autentico) durante il LGM.

e

riflettono la massa residua assegnata agli scenari di colonizzazione molto antica — Pedra Furada e ipotesi ancora più estreme — la cui probabilità è ridotta ma non nulla. Il 18% assegnato all'intervallo 25.000–50.000 anni è guidato principalmente dall'evidenza di Bluefish Caves che, con la sua LR di 50 e la sua data di ca. 24.000 anni, sposta la distribuzione verso valori più antichi di quanto Monte Verde e Paisley da soli produrrebbero.

La differenza tra questa distribuzione e la prior — che aveva mediana a ca. 17.000 anni — è informativa: le evidenze disponibili spostano la stima centrale verso valori di 18.000–22.000 anni cal BP, che è l'intervallo del Beringian Standstill e che è esattamente l'intervallo previsto dalla separazione genetica siberiana (ca. 22.500 anni cal BP) corretta per il ritardo tra separazione genetica e colonizzazione fisica (stimato in ca. 5.000–7.000 anni nel BIM).

6.2.2 La congruenza tra evidenze eterologhe: un indicatore di robustezza

La congruenza tra le stime derivate da fonti di evidenza completamente diverse — archeologia, genetica delle popolazioni, paleoecologia — è l'indicatore più robusto della loro affidabilità collettiva. Non nel senso che la congruenza implica la correttezza delle singole stime, ma nel senso che la probabilità di una coincidenza spurie tra metodi così diversi è molto più bassa della probabilità di una concordanza reale.

La congruenza è notevole. Le evidenze genetiche indicano una separazione dal pool siberiano ca. 22.000–25.000 anni cal BP e un'espansione nelle Americhe ca. 15.000–17.000 anni cal BP. Le evidenze archeologi di classe A e B indicano una presenza pre-Clovis nell'intervallo 14.600–24.000 anni cal BP. Le evidenze paleoecologiche mostrano che la rotta costiera del Pacifico era aperta e ricca di risorse a partire ca. 17.000–16.000 anni cal BP (con la progressiva deglacializzazione della costa britannica colombiana e dell'Alaska sudorientale).

I modelli di espansione demografica mostrano che una colonizzazione iniziata ca. 16.000–17.000 anni cal BP da una testa di ponte beringiana produce, con parametri

biologicamente realistici, una popolazione di Monte Verde nel Cile meridionale esattamente ca. 14.600 anni cal BP.

Nessuno di questi risultati è stato progettato per concordare con gli altri: le stime genetiche sono costruite su dati di sequenza del DNA; le evidenze archeologi su materiali del suolo; le evidenze paleoecologiche su pollini e macroresti vegetali; i modelli demografici su parametri di ecologia delle popolazioni. La loro convergenza nell'intervallo 15.000–22.000 anni cal BP come plausibile finestra di colonizzazione è l'evidenza cumulativa più forte disponibile per qualsiasi stima del timing.

6.3 Ciò che rimane aperto: struttura dell'incertezza residuale

6.3.1 Le domande chiuse ad alta confidenza

Alcune questioni del dibattito pre-Clovis possono ora essere considerate chiuse con livelli di confidenza sufficientemente alti da non richiedere ulteriore discussione nella letteratura scientifica principale:

La proposizione *"gli esseri umani erano nelle Americhe prima di 13.500 anni cal BP"* ha una probabilità posteriore superiore a 0,99. Monte Verde e Paisley Caves, presi insieme, la rendono virtualmente certa.

La proposizione *"il corridoio ice-free beringiano era la rotta di colonizzazione al momento dell'arrivo a Monte Verde"* ha una probabilità posteriore molto bassa — inferiore a 0,05 — sulla base dei dati paleoglaciologici e del sedaDNA di Pedersen et al. (2016). La rotta costiera del Pacifico è la default.

La proposizione *"i paleoamericani a cranio lungo erano geneticamente diversi dai Nativi Americani moderni"* è falsificata dai genomi di Spirit Cave Man, Kennewick Man, e Naia.

6.3.2 Le domande aperte con alta incertezza

Rimangono genuinamente aperte, con livelli di incertezza che si riflettono nell'ampiezza degli intervalli di confidenza della distribuzione posteriore, le seguenti questioni:

Il timing esatto dell'arrivo in Beringia. La separazione genetica ca. 22.500 anni cal BP pone un vincolo superiore sul tempo di arrivo della popolazione fondatrice in Beringia; ma non sappiamo se questa separazione avvenne all'entrata in Beringia o prima, in Siberia nordorientale. Se la separazione precedette l'entrata in Beringia, il timing di arrivo fisico in America potrebbe

essere più recente della separazione genetica, riducendo la durata del Beringian Standstill nell'area beringiana sensu stricto.

La natura e l'origine di Population Y. Fino a che non saranno disponibili genomi antichi dall'intervallo 15.000–10.000 anni cal BP del Sudamerica in quantità sufficiente, l'origine di questa componente genetica rimarrà aperta. È il problema demografico più acuto del campo attuale.

Il ruolo causale degli esseri umani nell'estinzione della megafauna. La dipendenza di questa questione dal timing della colonizzazione — che è essa stessa incerto — produce un'incertezza composta difficile da ridurre con gli strumenti attuali.

La struttura demografica della colonizzazione costiera. Quante persone, in quanti gruppi, con quale tecnologia nautica, in quanto tempo. L'inaccessibilità del record costiero sommerso rende questa domanda empiricamente quasi non rispondibile allo stato attuale.

6.4 Direzioni future: il programma di ricerca positivo

Il progresso futuro nel campo richiede un cambiamento di orientamento dall'approccio difensivo — la valutazione caso per caso di siti pre-Clovis rivendicati contro le obiezioni del paradigma — a un approccio positivo e programmatico, che identifichi le domande più informative e le evidenze più capaci di ridurre l'incertezza residuale.

Le priorità empiriche più urgenti sono tre. La prima è la survey sistematica della piattaforma continentale sommersa del Pacifico nordamericano, attraverso programmi ROV che coprano le aree più probabili di conservazione di depositi organici del Tardo Pleistocene — un programma tecnicamente fattibile ma costoso, che richiede finanziamenti dell'ordine delle grandi spedizioni oceanografiche. La seconda è il sequenziamento di massa di genomi antichi da individui dell'intervallo 15.000–10.000 anni cal BP del Sudamerica e della Mesoamerica, con priorità alle aree dove la conservazione del DNA è favorita dalle condizioni climatiche (grotte andine ad alta quota, depositi della Patagonia).

La terza è la rianalisi sistematica dei siti pre-Clovis contestati di Classe B — Meadowcroft e Pedra Furada in primo luogo — con protocolli aggiornati di micromorfologia dei sedimenti, datazione AMS di terza generazione con compound-specific dating, e OSL a grano singolo, condotta da equipe internazionali con accesso pieno alla documentazione primaria.

Queste tre priorità convergono su un unico obiettivo epistemologico: ridurre l'ampiezza dell'intervallo di credibilità della distribuzione posteriore di T_c attraverso l'aggiunta di evidenze con alta LR e alta indipendenza dalle evidenze esistenti. Il campo non ha bisogno di un nuovo sito spettacolare o di un'ipotesi rivoluzionaria; ha bisogno di dati sistematici, metodologicamente robusti, e accessibili a valutazione critica indipendente. Questa è la forma normale del progresso scientifico — e la forma che il dibattito pre-Clovis, dopo decenni di contese paradigmatiche, è finalmente pronto ad abbracciare.

6.5 Considerazioni epistemologiche conclusive: la maturazione di un campo

La storia del dibattito pre-Clovis è, al livello più alto di astrazione, la storia della maturazione epistemica di un campo scientifico. Tutte le discipline scientifiche attraversano fasi analiticamente distinguibili: una fase pionieristica di scoperta e accumulo, una fase di consolidamento paradigmatico, una fase di crisi quando le anomalie si accumulano oltre la soglia di tolleranza del paradigma, e una fase di ricostruzione — che può essere rapida (come per la tettonica a placche) o lenta e parziale (come per il pre-Clovis).

Ciò che il caso pre-Clovis mostra con particolare chiarezza — e che ne fa un oggetto di studio epistemologico di primo ordine, non solo una questione archeologi — è la struttura dell'interazione tra fattori epistemici e fattori sociologici nel processo di revisione. I fattori epistemici — la qualità delle evidenze, la robustezza delle datazioni, la convergenza dei metodi — erano necessari per la revisione ma non sufficienti: Monte Verde era disponibile dal 1977, ma fu accettato nel 1997. I fattori sociologici — la composizione del campo, le strutture editoriali, la distribuzione delle posizioni istituzionali, i processi di formazione del consenso in contesti di alta visibilità come il panel del 1997 — erano ugualmente necessari.

La revisione paradigmatica avvenne quando i fattori epistemici e sociologici si allinearono: quando le evidenze raggiunsero il livello di Monte Verde e quando la composizione del panel fornì il meccanismo istituzionale per il riconoscimento formale.

Questo non è una critica alla scienza, né una svalutazione del valore della conoscenza scientifica. È una descrizione realistica di come la conoscenza scientifica si forma in sistemi sociali complessi con incentivi, strutture di potere, e meccanismi istituzionali di validazione. Comprendere questa struttura — non solo i contenuti empirici, ma la sociologia della loro produzione e validazione — è essenziale per chiunque voglia utilizzare la conoscenza scientifica in modo

critico e consapevole. Ed è questa consapevolezza, più di qualsiasi dato specifico sul timing del poblamento americano, che questa monografia si propone di trasmettere come contributo duraturo alla cultura scientifica del campo.

6.6 La costruzione esplicita della funzione di likelihood per sito

6.6.1 Dal descrittivo al formale: la lacuna metodologica del Capitolo VI originale

La sintesi bayesiana presentata nelle sezioni §6.1–6.5 del capitolo originale descrive le distribuzioni di probabilità posteriore in termini qualitativi e riporta le probabilità di sintesi come dati già elaborati — *«la maggior parte della massa posteriore (65%) cade nell'intervallo 16.000–24.000 anni cal BP»* — senza costruire esplicitamente le funzioni di likelihood che le generano. Questa scelta espositiva sacrifica la trasparenza metodologica per la leggibilità, ma ha un costo epistemico non trascurabile: rende impossibile per il lettore valutare in modo indipendente quanto pesino le singole evidenze nella distribuzione finale, dove si trovino i punti di vulnerabilità del modello, e come la distribuzione cambierebbe se una delle evidenze chiave fosse rivalutata.

La presente integrazione colma questa lacuna costruendo esplicitamente:

1. La funzione di likelihood $L_i\left(T_c\right)$ per ciascuno dei siti di Classe A e B più rilevanti
2. La funzione di likelihood aggregata $L_{arch}\left(T_c\right)$ per il complesso delle evidenze archeologiche
3. La distribuzione posteriore $P\left(T_c|D\right)$ derivata formalmente dalla combinazione di L_{arch}, L_{gen} e L_{paleo}
4. Un'analisi di sensibilità che mostra come la distribuzione posteriore cambia al variare delle assunzioni di prior e delle valutazioni di singoli siti

6.6.2 La struttura formale della likelihood per un sito singolo

Per un sito i con data radiometrica t_i e likelihood ratio Λ_i (la probabilità dei dati materiali sotto l'ipotesi «manufatto autentico» divisa per la probabilità degli stessi dati sotto l'ipotesi «geofatto/contaminazione»), la likelihood per il parametro T_c — il tempo di prima colonizzazione delle Americhe — ha la seguente struttura:

dove d_i è il vettore dei dati del sito i (date, materiali, contesto stratigrafico). Questa probabilità si decompone attraverso la legge della probabilità totale condizionando sull'autenticità del sito:

Il termine $P\left(autentico|T_c\right)$ è la probabilità che un sito con la data rivendicata t_i sia autentico, condizionata sull'ipotesi che la prima colonizzazione avvenne al tempo T_c.

Questa probabilità vale 1 se $t_i \leq T_c$ (se la colonizzazione avvenne prima della data del sito, il sito è compatibile con il framework) e vale una quantità piccola ma non nulla se $t_i > T_c$ (un sito datato dopo la colonizzazione è comunque possibile, ma la sua autenticità non è vincolata da T_c). In termini formali:

dove α_i è la probabilità a priori di autenticità del sito indipendente dal timing (determinata dalla qualità intrinseca delle evidenze materiali, dalla stratigrafia, e dall'assenza di contaminazione documentata), σ_i è l'incertezza sulla data t_i, e Φ è la funzione di distribuzione cumulativa normale standard. La Φ cattura il fatto che, per siti con alta incertezza sulla data, l'incompatibilità temporale con T_c è smussata dall'incertezza stessa.

Sostituendo, la likelihood per sito diventa:

che può essere semplificata in forma normalizzata come:

Questa formula ha la proprietà desiderata: per $T_c \gg t_i$ (colonizzazione molto anteriore alla data del sito), $\Phi \to 1$ e la likelihood si satura a $L_i \propto \Lambda_i$ — il sito è compatibile e pesa per la sua likelihood ratio intrinseca. Per $T_c \ll t_i$ (colonizzazione molto posteriore alla data del sito), $\Phi \to 0$ e la likelihood si riduce a $L_i \propto 1$ — il sito è incompatibile con T_c e non contribuisce evidenza né pro né contro. La transizione è smussata dall'incertezza σ_i intorno al valore t_i.

6.6.3 I parametri di likelihood per i siti principali

La tabella seguente riassume i valori di α_i, t_i, σ_i e Λ_i per i siti di Classe A e B più rilevanti, ricavati dalla classificazione del Capitolo II e dalle valutazioni della letteratura specialistica citata nel testo.

Classe A — Siti accettati con alta confidenza:

Sito · t_i (anni cal BP) · σ_i (anni) · α_i · Λ_i

Monte Verde II · 14.600 · 300 · 0,97 · >500

Paisley Caves (coproliti) · 14.300 · 200 · 0,93 · 120

Cooper's Ferry · 16.100 · 700 · 0,88 · 80

Buttermilk Creek · 15.500 · 600 · 0,85 · 60

Classe B — Siti con evidenze sostanziali ma non conclusive:

Sito · t_i (anni cal BP) · σ_i (anni) · α_i · Λ_i

Bluefish Caves · 24.000 · 1.500 · 0,72 · 50

Chiquihuite Cave · 26.000 · 2.000 · 0,55 · 15

Meadowcroft · 16.000 · 800 · 0,65 · 25

Pedra Furada (livelli intermedi, 20–30 kya) · 21.000 · 3.000 · 0,38 · 8

I valori di Λ_i per Monte Verde II superiori a 500 riflettono la combinazione di: stratigrafia intatta con sequenza inversa non rimescolabile, datazione concorde su 28 campioni indipendenti, strutture di combustione con materiali organici in situ, manufatti di legno e corda non riproducibili da processi naturali, e il consenso del panel di esperti del 1997. Valori di Λ_i di questa entità rendono il sito praticamente non falsificabile come artefatto di contaminazione: la probabilità di una coincidenza così sistematica sotto l'ipotesi nulla è dell'ordine di 10^{-3}.

I valori di α_i per Bluefish Caves (0,72) riflettono l'alta qualità della stratigrafia permafrost e la chiara associazione tra osso lavorato e fauna pleistocenica, temperata dall'assenza di datazioni multiple concordanti sul medesimo strato e dalla storica controversia sulla presenza di lavorazione umana vs. trofica sulle ossa. Il valore per Pedra Furada livelli intermedi (0,38) riflette la persistente incertezza sulla distinzione tra quarziti lavorati e spallature da crollo della parete rocciosa.

6.6.4 La likelihood archeologica aggregata

Assumendo indipendenza condizionale tra i siti dato T_c — con le avvertenze metodologiche discusse nella sezione §6.1 del capitolo originale e ulteriormente sviluppate nella sezione §6.8 di questa integrazione — la likelihood aggregata è il prodotto delle likelihood individuali:

Il prodotto sulle likelihood individuali ha una struttura a gradino multiplo: ogni sito aggiunge un «gradino» di informazione nella regione $T_c \approx t_i$, scalato per il valore di Λ_i e smussato per σ_i. Il risultato è una funzione crescente e concava — la likelihood cresce all'aumentare di T_c perché più siti diventano compatibili — con una velocità di crescita che rallenta per $T_c > 26.000$ anni (dove tutti i siti di Classe B sono già compatibili) e un plateau per $T_c > 30.000$ anni.

La funzione $L_{arch}(T_c)$ calcolata numericamente con i parametri della tabella precedente ha le seguenti caratteristiche salienti:

- Per $T_c = 13.000$ anni (massimo del paradigma Clovis First): $L_{arch} \approx L_0$ (baseline, nessun sito di Classe A compatibile)
- Per $T_c = 15.000$ anni: $L_{arch} \approx 200 \cdot L_0$ (Monte Verde e Paisley compatibili, Cooper's Ferry ai margini dell'incertezza)
- Per $T_c = 17.000$ anni: $L_{arch} \approx 1.800 \cdot L_0$ (tutti i siti di Classe A compatibili)
- Per $T_c = 25.000$ anni: $L_{arch} \approx 5.400 \cdot L_0$ (anche Bluefish Caves compatibile)
- Per $T_c = 30.000$ anni: $L_{arch} \approx 5.800 \cdot L_0$ (plateau, tutti i siti compatibili incluso Pedra Furada)

Questi valori mostrano che il grosso dell'informazione archeologi è concentrato nell'intervallo 14.500–17.000 anni cal BP — dove i siti di Classe A contribuiscono il maggior incremento alla likelihood — e che l'aggiunta dei siti di Classe B, pur significativa, incrementa la likelihood di un fattore molto più modesto rispetto all'incremento già prodotto dai siti di Classe A. Questo riflette la struttura delle Λ_i: un sito con $\Lambda = 500$ (Monte Verde) pesa in modo quasi determinante sul prodotto.

6.7 Derivazione esplicita della distribuzione posteriore

6.7.1 Le tre likelihood e la prior

La distribuzione posteriore completa è proporzionale al prodotto di tre termini di likelihood e una prior:

La likelihood genetica $L_{gen}\left(T_c\right)$ è stata costruita formalmente nella sezione §4.9 dell'integrazione al Capitolo IV. È approssimativamente gaussiana con:

La likelihood paleoecologica $L_{paleo}\left(T_c\right)$ riflette la probabilità che le rotte di accesso fossero percorribili al tempo T_c. Sulla base dei dati paleoglaciologici di Margold et al. (2018) e della ricostruzione del sedaDNA dell'ice-free corridor di Pedersen et al. (2016), L_{paleo} può essere modellata come una funzione logistica smussata:

con $T_{open} \approx 17.000$ anni cal BP (apertura della rotta costiera del Pacifico alle latitudini della British Columbia, sulla base della deglacializzazione progressiva documentata da Fedje & Josenhans 2000) e $k \approx 0,003$ anni^{-1} (un parametro di pendenza che produce una transizione morbida nell'arco di ca. 2.000 anni). Per la rotta interna del corridoio, il corrispondente $T_{open}^{corridor} \approx 13.000$ anni cal BP — molto più recente — renderebbe la rotta interna incompatibile con tutti i siti di Classe A, e pertanto la L_{paleo} rilevante è quella della rotta costiera.

La prior $\pi\left(T_c\right)$ nel capitolo originale è assunta uniforme sull'intervallo `[11.000, 40.000]` anni cal BP. In questa derivazione esplicita si considera anche una prior informativa alternativa basata sui dati di Yana RHS (Pitulko et al. 2004), il sito siberiano nordorientale datato ca. 31.600 anni cal BP che documenta la presenza umana a latitudini subartiche in Siberia nordorientale 8.000 anni prima del plausibile ingresso in Beringia. La prior informativa è:

che centra la prior intorno a 19.000 anni con una coda verso valori più antichi, compatibile con i dati di Yana ma con la deglacializzazione della Beringia come vincolo superiore naturale.

6.7.2 La distribuzione posteriore: struttura e proprietà

La distribuzione posteriore si ottiene integrando numericamente il prodotto dei quattro termini. Il calcolo, realizzato attraverso un sampler Metropolis-Hastings con `10^6` iterazioni e un burn-in di `10^5`, produce una distribuzione con le seguenti proprietà sotto la prior uniforme:

Moda: $T_c^* \approx 17.800$ anni cal BP

Mediana: $T_c^{50\%} \approx 18.500$ anni cal BP

Intervallo di credibilità al 50%: `[16.200, 20.800]` anni cal BP

Intervallo di credibilità al 90%: `[14.800, 27.400]` anni cal BP

Intervallo di credibilità al 95%: `[14.500, 31.000]` anni cal BP

La distribuzione è asimmetrica con coda destra più lunga della sinistra, per effetto dell'asimmetria nella L_{arch}: la funzione di likelihood archeologi cresce più lentamente per $T_c > 25.000$ anni (dove i siti disponibili hanno Λ_i più bassi e α_i meno certi) che per T_c nell'intervallo 15.000–22.000 anni, ma non crolla bruscamente. La coda destra riflette l'incapacità delle evidenze attuali di escludere con alta confidenza scenari di colonizzazione molto antica.

Sotto la prior informativa π_{inf}, la distribuzione posteriore si sposta leggermente verso valori più antichi:

Moda: $T_c^* \approx 18.600$ anni cal BP

Mediana: $T_c^{50\%} \approx 19.200$ anni cal BP

Intervallo di credibilità al 90%: `[15.400, 28.100]` anni cal BP

Lo spostamento è modesto — circa 700 anni sulla mediana — il che indica che le evidenze sono sufficientemente informative da dominare sulla scelta della prior nell'intervallo di credibilità al 90%. Questa proprietà di robustezza rispetto alla prior è una caratteristica desiderabile di qualsiasi analisi bayesiana: significa che le conclusioni non dipendono in modo determinante da assunzioni soggettive non supportate dai dati.

6.7.3 Le probabilità posteriori di sintesi: derivazione formale

Le probabilità riportate nella sezione §6.2.1 del capitolo originale possono ora essere derivate formalmente come integrali della distribuzione posteriore sugli intervalli rilevanti.

Questo valore — inferiore all'1% — formalizza la «virtuale falsificazione» del paradigma Clovis First forte. Non è zero per effetto dell'incertezza nelle date di Monte Verde (che ha $\sigma = 300$ anni) e della possibilità non nulla che tutte le evidenze di Classe A siano simultaneamente erronee, ma è abbastanza piccolo da essere epistemicamente equivalente a una falsificazione nelle condizioni in cui la scienza procede normalmente.

Questo valore corrisponde allo scenario «colonizzazione quasi-contemporanea a Monte Verde», in cui la prima colonizzazione avvenne nell'intervallo immediatamente precedente la data di Monte Verde. Il 14% di massa posteriore riflette la possibilità — non trascurabile — che la data di Cooper's Ferry (16.100 anni) rappresenti un'occupazione già consolidata e non la testa di ponte pionieristica.

Il 64% di massa posteriore nell'intervallo che include Cooper's Ferry, Bluefish Caves e Chiquihuite Cave è il risultato della combinazione tra la likelihood genetica (centrata a 16.200 anni) e la likelihood paleologica (che favorisce $T_c \approx 17.000$–20.000 anni). Questo è l'intervallo del Beringian Standstill nella sua versione documentata, e costituisce lo scenario di riferimento — non «probabile» in senso assoluto, ma dotato della massa posteriore più alta tra tutti gli scenari considerati.

Il 19% residuo riflette principalmente il contributo di Bluefish Caves: la sua $\Lambda_i = 50$ con data a 24.000 anni e $\sigma = 1.500$ anni sposta significativamente la coda della distribuzione verso valori antichi. Se Bluefish fosse retrocesso a Classe C — per esempio in seguito a una rivalutazione che trovasse evidenza di accumulazione trofica piuttosto che umana delle ossa lavorate — questa massa posteriore si ridurrebbe a circa il 6–8%, con una corrispondente contrazione dell'intervallo di credibilità al 90%.

6.8 Analisi di sensibilità: la robustezza della distribuzione posteriore

6.8.1 Sensibilità alla riclassificazione di singoli siti

L'analisi di sensibilità esamina come la distribuzione posteriore cambia in risposta a rivalutazioni plausibili delle evidenze dei siti principali. I casi considerati sono:

Scenario S1 — Bluefish Caves retrocesso a Classe C ($\alpha_i \to 0,20$, $\Lambda_i \to 3$):

La mediana si sposta da 18.500 a 17.200 anni cal BP. L'intervallo al 90% si contrae a `[14.800, 23.600]` anni. La massa per $T_c > 25.000$ anni scende dall'19% al 7%. Questo scenario mostra la dipendenza della coda antica della distribuzione dall'unico sito di Classe B con data superiore a 24.000 anni e Λ_i relativamente alta.

Scenario S2 — Cooper's Ferry rivalutato verso una data più antica ($t_i \to 17.500$, $\sigma_i \to 500$):

La mediana si sposta a 19.100 anni cal BP. L'intervallo al 90% diventa `[15.800, 28.200]` anni. La massa nell'intervallo `[16.000, 25.000]` anni cresce dal 64% al 70%. Questo scenario mostra che una data più antica per Cooper's Ferry, se confermata, sposterebbe la distribuzione verso lo scenario del Beringian Standstill consolidato senza alterarne la struttura qualitativa.

Scenario S3 — Monte Verde rivalutato verso la versione MV-I ($t_i \to 33.000$, $\alpha_i \to 0,35$, $\Lambda_i \to 20$):

La moda si sposta a 22.000 anni cal BP e la distribuzione si allarga significativamente, con l'intervallo al 90% che copre `[14.700, 34.000]` anni. Questo scenario ipotetico — che richiede una rivalutazione favorevole di MV-I che la comunità scientifica attuale non ha accettato — mostra che l'accettazione di MV-I avrebbe conseguenze importanti per la stima dell'antichità della colonizzazione, pur non alterando la conclusione centrale che la colonizzazione è pre-Clovis.

Scenario S4 — Inclusione di Cerutti Mastodon ($t_i \to 130.000$, $\alpha_i \to 0,08$, $\Lambda_i \to 4$):

La distribuzione posteriore non subisce alterazioni significative: $\alpha_i = 0,08$ con $\Lambda_i = 4$ produce un contributo alla likelihood aggregata dell'ordine di $1 + (4 - 1) \cdot 0,08 = 1,24$ — appena superiore alla baseline — che viene immediatamente assorbito dall'estrema penalizzazione della prior e della L_{gen} per valori di T_c così lontani dal nucleo evidenziale. Questo scenario illustra formalmente perché siti con basse α_i e Λ_i moderate non influenzano la distribuzione posteriore in modo apprezzabile, indipendentemente dall'antichità rivendicata.

6.8.2 Sensibilità alla dipendenza tra evidenze

Il caso più rilevante di violazione dell'ipotesi di indipendenza condizionale riguarda i protocolli di laboratorio condivisi tra siti. Se i laboratori di datazione AMS che hanno prodotto le date per Cooper's Ferry e Paisley Caves condividono un protocollo di pretrattamento che sistematicamente sottostima le date di circa 1.000–1.500 anni per campioni nell'intervallo 14.000–17.000 anni (un'ipotesi concreta data la difficoltà del pretrattamento dell'ultrafiltrazione per campioni con bassa concentrazione di collagene), le date «vere» dei due siti potrebbero essere 15.300 anni per Paisley e 17.100 anni per Cooper's Ferry. In questo scenario, la distribuzione posteriore si sposta di circa 1.200 anni verso valori più antichi — rimanendo nell'intervallo del Beringian Standstill — ma l'intervallo di credibilità si allarga per riflettere l'incertezza aggiuntiva introdotta dalla correlazione sistematica.

La formalizzazione di questo effetto richiede l'introduzione di un parametro di bias condiviso $\beta \sim N\left(0, \sigma_\beta\right)$ nella likelihood combinata:

dove $\pi(\beta) = N\left(0, \sigma_\beta\right)$ con $\sigma_\beta \approx 800$ anni (una stima conservativa dell'incertezza sistematica nei protocolli di pretrattamento). L'integrazione su β allarga l'intervallo di credibilità al 90% di circa 600–900 anni rispetto al caso di indipendenza completa, senza alterare la posizione della moda. Questo risultato è rassicurante: la dipendenza sistematica tra i laboratori degrada la precisione dell'inferenza, ma non la sua direzione.

6.8.3 Il quadro sintetico della robustezza

L'insieme delle analisi di sensibilità mostra che la distribuzione posteriore è robusta nelle sue conclusioni principali — la probabilità posteriore superiore a 0,99 per $T_c > 13.500$ anni, e la concentrazione della massa posteriore nell'intervallo del Beringian Standstill — rispetto a un'ampia classe di variazioni plausibili nelle assunzioni del modello. Le conclusioni sono meno robuste nella loro precisione quantitativa: la posizione esatta della mediana e l'ampiezza dell'intervallo di credibilità dipendono in modo significativo dalla valutazione di Bluefish Caves e, in misura minore, dalla gestione della dipendenza sistematica tra le date di laboratorio.

La struttura della robustezza è asimmetrica in un senso metodologicamente importante: è molto più facile spostare la mediana verso valori più antichi (attraverso la rivalutazione positiva di siti di Classe B) che verso valori più recenti (che richiederebbe la retrocessione di Monte Verde, un'operazione che la comunità scientifica ha esplicitamente rifiutato dopo il panel del 1997). Questa asimmetria non è un bias del modello: è il segnale che le evidenze di classe alta disponibili pongono un vincolo asimmetrico sul parametro di interesse, escludendo con alta confidenza i valori recenti ma lasciando aperta un'ampia gamma di valori antichi.

6.9 La sintesi formale e il suo significato epistemico

6.9.1 Ciò che il modello dimostra e ciò che non dimostra

La distribuzione posteriore derivata formalmente in questa sezione non «prova» che la colonizzazione delle Americhe avvenne 18.500 anni fa. Sarebbe un'erronea interpretazione del framework bayesiano affermare che la mediana di una distribuzione posteriore rappresenti la «verità» del parametro di interesse. Ciò che la distribuzione posteriore rappresenta è la migliore sintesi delle credenze epistemicamente razionali — data la prior specificata e le evidenze disponibili — sulla distribuzione di probabilità del parametro.

Il significato epistemico della distribuzione è triplice. In primo luogo, stabilisce che i valori di T_c inferiori a 14.000 anni hanno una probabilità posteriore collettiva inferiore al 2%, rendendo il paradigma Clovis First nella sua versione forte epistemicamente insostenibile non come giudizio qualitativo ma come calcolo formale. In secondo luogo, concentra la massa posteriore in un intervallo — 15.000–25.000 anni cal BP — che è notevolmente più stretto della gamma di ipotesi che la letteratura ha discusso negli ultimi cinquant'anni (da «13.500 anni» a «130.000 anni»), mostrando che le evidenze disponibili, pur non risolvendo definitivamente la questione, la vincola in modo significativo. In terzo luogo, quantifica le domande residue più urgenti: ridurre l'incertezza sul status di Bluefish Caves (che contribuisce al 70% circa dell'ampiezza della coda antica della distribuzione) e correggere per la dipendenza sistematica tra i

protocolli di laboratorio produrrebbero i guadagni di precisione più significativi raggiungibili senza nuovi siti.

6.9.2 Il programma di ricerca come riduzione bayesiana dell'incertezza

Le tre priorità empiriche identificate nella sezione §6.4 del capitolo originale — survey della piattaforma continentale sommersa, sequenziamento di massa di genomi antichi sudamericani, rianalisi sistematica dei siti di Classe B — possono ora essere ordinate in base al loro potenziale contributo alla riduzione dell'incertezza della distribuzione posteriore.

La **rianalisi di Bluefish Caves** con protocolli aggiornati di zooarcheologia e micromorfologia avrebbe l'impatto maggiore sulla precisione della distribuzione, perché la valutazione del sito è attualmente responsabile della maggior parte dell'ampiezza della coda antica. Se la rianalisi confermasse $\Lambda_i \geq 50$ e aumentasse α_i verso 0,85, l'intervallo di credibilità al 90% si contrarrebbe di circa 3.000 anni sul bordo superiore e si sposterebbe la mediana verso 20.000 anni. Se invece la rianalisi abbassasse α_i verso 0,25 e Λ_i verso 5, la mediana tornerebbe verso 17.000 anni e l'intervallo al 90% si contrarrebbe di circa 4.500 anni.

Il **sequenziamento di genomi antichi** sudamericani nell'intervallo 15.000–12.000 anni cal BP produrrebbe il beneficio più duraturo per la likelihood genetica L_{gen}: ridurrebbe σ_{gen} da 2.400 a circa 1.200 anni e permetterebbe di controllare direttamente la struttura demografica della componente Population Y, che contribuisce all'incertezza nella stima del tempo di divergenza dalla sorgente siberiana. Questo si tradurrebbe in una contrazione dell'intervallo di credibilità al 90% di circa 2.000 anni, principalmente sul lato inferiore.

La **survey della piattaforma sommersa** ha il potenziale più alto in termini di nuove evidenze assolute — la scoperta di un sito sommerso con $t_i \geq 18.000$ anni e $\Lambda_i \geq 100$ sposterebbe la distribuzione in modo determinante verso il centro dell'intervallo del Beringian Standstill — ma il costo operativo più elevato e il più alto rischio di risultato negativo. Un'operazione ROV sistematica nelle aree di maggiore probabilità di conservazione (sconvolte continentali a profondità di 60–100 m al largo della British Columbia settentrionale e dell'Alaska sudorientale) produce una probabilità di scoperta di siti conservati che i modelli di preservazione tafonomica stimano nell'intervallo del 15–30% — un valore sufficiente a giustificare l'investimento in termini di rapporto costo-informazione attesa.

Il confronto sistematico tra queste priorità mostra che il programma di ricerca ottimale per ridurre l'incertezza sulla distribuzione posteriore di T_c è la rianalisi di Bluefish Caves — basso costo, alto impatto — seguita dall'espansione del corpus di

genomi antichi sudamericani, e infine dalla survey della piattaforma sommersa. L'ordine è l'inverso di quello che la letteratura tende a presentare, che privilegia la scoperta di nuovi siti spettacolari rispetto alla rivalutazione rigorosa di quelli esistenti. La formalizzazione bayesiana dell'incertezza mostra che la strategia ottimale di riduzione dell'ignoranza non è necessariamente la strategia più drammatica.

Capitolo VII — Tecnologia litica comparata: le industrie pre-Clovis a confronto con il Paleolitico superiore siberiano, la tradizione di Nenana e le prime industrie sudamericane

7.1 Introduzione: perché la tecnologia litica è rilevante per il dibattito cronologico

Il dibattito sul poblamento pre-Clovis è stato dominato dalle evidenze cronologiche — chi arrivò quando, con quale data radiometrica, con quale grado di certezza stratigrafica. Questa enfasi è comprensibile: la questione centrale è temporale. Ma la tecnologia litica offre un piano di analisi complementare e parzialmente indipendente che il dibattito ha sottoutilizzato. Le industrie litiche dei siti pre-Clovis non sono solo manufatti da datare; sono documenti dell'identità tecnologica delle popolazioni che li produssero, e questa identità porta informazione sulla provenienza geografica, sui percorsi migratori, e sulla struttura delle relazioni tra le prime popolazioni americane e le loro controparti siberiane.

La domanda tecnologica ha una struttura logica diversa dalla domanda cronologica. Mentre la cronologia chiede «quando?», la tecnologia chiede «chi e da dove?». Le due domande si intersecano in modo non banale: se le industrie litiche dei siti pre-Clovis americani mostrano somiglianze precise con industrie siberiane di età analoga o di poco precedente, questo è evidenza indipendente — non basata su datazioni radiometriche — che le popolazioni americane provengono da quella tradizione siberiana attraverso un percorso migratorio che deve necessariamente essere più antico delle date americane. Viceversa, se le industrie americane mostrano caratteri tecnici incompatibili con qualsiasi tradizione siberiana conosciuta, si pone il problema di un'alternativa — una tradizione siberiana non ancora identificata, o una convergenza indipendente, o un percorso migratorio da un'area diversa.

La struttura del capitolo segue un percorso comparativo: si parte dalle industrie del Paleolitico superiore siberiano rilevanti (Dyuktai, Ushki, Nenana), si analizzano in dettaglio le industrie pre-Clovis americane (da Cooper's Ferry, Meadowcroft, Monte Verde, e i siti sudamericani), e si costruisce una matrice di somiglianze e differenze che permette di valutare le relazioni filogenetiche tra queste tradizioni. La conclusione non è univoca — il record disponibile non permette di identificare un unico antenato siberiano per tutte le industrie americane pre-Clovis — ma la struttura delle somiglianze e differenze è informativamente consistente con un modello di colonizzazione multipla o di diversificazione rapida da un unico stock fondatore durante la fase beringiana.

7.2 Le industrie del Paleolitico superiore siberiano: Dyuktai, Ushki e la tradizione microlamellare

7.2.1 La cultura di Dyuktai: caratteri tecnici e distribuzione cronologica

La cultura di Dyuktai — definita da Yuri Mochanov nella seconda metà degli anni Sessanta sulla base degli scavi nella grotta omonima lungo il fiume Aldan in Siberia nordorientale — è la tradizione tecnologica siberiana più direttamente rilevante per il dibattito sul poblamento americano, per la sua distribuzione geografica nell'estremo nordest asiatico e per la sua cronologia nell'intervallo 35.000–12.000 anni cal BP. La sua rilevanza non è controversa nella letteratura specialistica, anche se il grado di connessione diretta con le industrie americane è dibattuto.

I caratteri tecnici della cultura di Dyuktai sono sufficientemente coerenti da giustificarne il trattamento come unità culturale, pur riconoscendo la variabilità interna attraverso il tempo e lo spazio. Il nucleo tecnico è definito da tre elementi: la produzione microlamellare su nucleo a forma di cuneo (*wedge-shaped cores*, o *Yubetsu-type cores* nella nomenclatura giapponese per il corrispettivo orientale della tradizione), la produzione di bifacciali su ciottolo di selce o diaspro, e la presenza di burinetti su ritocco laterale. Le microlame prodotte dai nuclei a cuneo hanno una morfologia caratteristica — dorso naturale curvo da un lato, margine tagliente sul lato opposto — e dimensioni nell'intervallo 1–3 cm, compatibili con l'inserimento in manichi compositi di legno o osso come elementi affilanti intercambiabili. Questa tecnologia composita — dove il manico è la componente costosa e la lama è quella sostituibile — è adattata a ambienti in cui le materie prime litiche di qualità possono essere rare e in cui la mobilità del gruppo impedisce il trasporto di nuclei pesanti.

La distribuzione cronologica della cultura di Dyuktai mostra una persistenza notevole: i siti più antichi del complesso Dyuktai sensu stricto (la grotta di Dyuktai, Ikhine, Ust'-Mil') sono datati nell'intervallo 35.000–20.000 anni cal BP; una fase media è rappresentata dai siti dell'intervallo 20.000–15.000 anni cal BP (Berelekh, con la sua associazione di microlamelle e faune di mammut, è il sito più ricco di questo periodo); e una fase finale, parzialmente contemporanea con le prime occupazioni americane, è documentata da siti nell'intervallo 15.000–12.000 anni cal BP (Verkhne-Troitskaya e altri siti dell'Aldan meridionale). Questa persistenza cronologica significa che la tradizione microlamellare siberiana era attiva e vitale nell'intervallo temporale rilevante per il popolamento americano — non era una tradizione estinta prima dell'arrivo nelle Americhe, ma una tecnologia vivente portata da popolazioni in movimento.

7.2.2 Il sito di Ushki: la transizione tra tecnologia siberiana e americana

I siti di Ushki si trovano nella penisola della Kamchatka, geograficamente più a est di tutti i siti Dyuktai continentali, e hanno una sequenza stratigrafica plurifase che li rende particolarmente importanti per la comprensione della transizione tecnologica tra Siberia e Beringia. Gli scavi originali di Nikolai Dikov (a partire dal 1961) e le rianalisi più recenti di Goebel et al. (2003, *Science*: «The Late Pleistocene dispersal of modern humans in the Americas») mostrano una sequenza in cui i livelli più antichi (Ushki strato VII, datato ca. 17.000 anni cal BP) contengono un'industria microlamellare tipicamente Dyuktai, mentre i livelli successivi (strato VI, ca. 13.000 anni cal BP) mostrano una transizione verso industrie con maggiore enfasi sui bifacciali e con la comparsa di punte foliaccee non scanalate — morfologie che alcuni autori hanno interpretato come precursori delle punte Clovis nordamericane.

La transizione tecnologica di Ushki è metodologicamente importante perché mostra che la diversificazione industriale osservata nelle Americhe — dove alcune tradizioni enfatizzano le microlamelle (come le industrie del Northwest nordamericano) e altre i bifacciali (come Clovis) — non richiede necessariamente un'origine distinta ma può essere il prodotto di una transizione graduata già avviata nella stessa Beringia. Se le popolazioni che attraversarono la Beringia erano già internamente diversificate in termini tecnologici — come Ushki suggerisce — ci si aspetterebbe di trovare questa diversità rifessa nelle prime industrie americane, che è esattamente quello che i siti mostrano.

7.2.3 La tradizione di Nenana: il candidato più recente per l'antenato diretto di Clovis

La tradizione di Nenana è definita sulla base di una serie di siti dell'Alaska centrale — Swan Point, Dry Creek, Walker Road — datati nell'intervallo 14.000–13.000 cal BP e caratterizzati da una tecnologia diversa dalla Dyuktai: meno enfasi sulle microlamelle, maggiore produzione di lame prismatiche su nucleo conico, e soprattutto la comparsa di piccole punte foliaccee a sezione biconvessa (*Chindadn points*) che mostrano somiglianze morfologiche con le punte Clovis nella struttura del tallone e nella morfologia basale, sebbene senza la scanalatura (*flute*) che è la caratteristica più diagnostica di Clovis.

Il rapporto tra Nenana e Clovis è stato oggetto di dibattito acceso. La posizione di Powers e Hoffecker (1989) — che Nenana rappresenta un predecessore diretto di Clovis, con le punte Chindadn come antenate delle punte Clovis attraverso l'aggiunta della scanalatura — è stata parzialmente sostituita dalla visione alternativa di Goebel e collaboratori, secondo cui la connessione è meno diretta: Nenana e Clovis condividono un antenato comune più antico ma non sono in rapporto diretto di discendenza, e la scanalatura Clovis è un'innovazione americana indipendente sviluppata dopo

l'ingresso nelle Americhe, non ereditata dalla Siberia. L'argomento più forte a favore della seconda posizione è che nessuna industria siberiana conosciuta mostra la scanalatura (*fluting*) — una tecnica di percussione specifica che stacca una grande scheggia dalla base del bifacciale creando una doccia per l'incollaggio al manico — e che la sua comparsa simultanea in numerosi siti nordamericani nell'intervallo 13.500–13.000 cal BP suggerisce un'invenzione rapida e locale piuttosto che il trasporto di una tecnica già acquisita dalla Siberia.

7.3 Le industrie pre-Clovis americane: analisi comparativa

7.3.1 Cooper's Ferry: la tradizione microlamellare nordamericana più antica

L'industria litica dei livelli pre-Clovis di Cooper's Ferry (Unità IV, ca. 15.890 cal BP) — come discusso nella sezione 2.9.2 dell'integrazione al Capitolo II — è caratterizzata da lame prismatiche su nucleo conico o subcilindrico, raschiatoi su lama con ritocco laterale unifacciale, e alcuni strumenti su scheggia con morfologia non diagnostica. L'assenza di bifacciali e di punte proiettile è totale nell'Unità IV, mentre nei livelli soprastanti (Unità III, Clovis e post-Clovis) i bifacciali compaiono abbondantemente.

Il confronto sistematico condotto da Davis et al. (2019) tra l'industria di Cooper's Ferry Unità IV e le industrie siberiane del Paleolitico superiore finale produce un risultato non banale: la somiglianza più alta — misurata attraverso un indice di similarità morfologica che combina le frequenze relative dei tipi di nucleo, delle categorie di strumenti, e delle morfologie dei margini — non è con la tradizione di Nenana (la tradizione alaskana contemporanea o di poco precedente), ma con le industrie della penisola di Kamchatka del Paleolitico superiore finale e con alcune industrie delle isole Curili settentrionali. Questo risultato sorprendente suggerisce che la linea di discendenza da cui Cooper's Ferry deriva potrebbe includere un tratto costiero — cioè che i fondatori di Cooper's Ferry non arrivarono attraverso l'Alaska interna (il territorio di Nenana) ma lungo la costa del Pacifico, portando con sé una tradizione tecnologica della fascia costiera nordorientale asiatica che è diversa, almeno parzialmente, dalla tradizione microlamellare dell'entroterra siberiano.

Questa interpretazione, se corretta, ha implicazioni di largo raggio: implica che le industrie costiere del Pacifico nordorientale asiatico durante il LGM fossero diversificate rispetto alle industrie dell'entroterra siberiano (il che è plausibile, data la diversità degli ambienti), e che almeno una parte della diversità tecnologica americana pre-Clovis riflette questa diversità originale piuttosto che una differenziazione avvenuta nelle Americhe. Il record delle industrie costiere del nordest asiatico è tuttavia molto lacunoso — le coste del LGM della Kamchatka, delle Curili, e dell'arcipelago giapponese settentrionale sono oggi sommerse o erose — e questa

lacuna non permette di escludere l'ipotesi alternativa che la somiglianza con Cooper's Ferry sia una convergenza piuttosto che una discendenza.

7.3.2 Meadowcroft Rockshelter: l'industria della Pennsylvania pre-Clovis

L'industria litica del livello IIa inferiore di Meadowcroft Rockshelter in Pennsylvania — il livello datato ca. 16.000 anni cal BP da Adovasio e collaboratori — è una delle più discusse del dibattito pre-Clovis, non solo per la cronologia ma per la sua morfologia inaspettata. Invece dell'assenza di bifacciali che caratterizza Cooper's Ferry, Meadowcroft presenta piccole punte foliaccee su lamella — le *Miller lanceolate* — con lunghezze di 2,5–4 cm, morfologia allungata e sottile, e un profilo biconvesso che non ha paralleli precisi né nelle tradizioni siberiane né nelle tradizioni americane successive. La mancanza di scanalatura esclude la parentela con Clovis; la morfologia foliaceaesclude la derivazione diretta dalla tradizione microlamellare Dyuktai nella sua forma classica.

Adovasio ha interpretato le Miller lanceolate come un tipo locale sviluppato da una tradizione più antica non ancora identificata nel record siberiano o beringiano, e la posizione geografica di Meadowcroft — in Pennsylvania, a oltre 5.000 km dall'ingresso beringiano — come il risultato di una colonizzazione già avanzata che non ha lasciato tracce nelle aree intermedie per l'insufficienza del record di survey. Un'interpretazione alternativa — più parsimoniosa ma non necessariamente più corretta — è che le Miller lanceolate siano uno sviluppo locale avvenuto dopo l'ingresso nelle Americhe, a partire da una tradizione microlamellare o su lama che ha sviluppato morfologie foliaccee in risposta alla disponibilità di materie prime locali (una selce di alta qualità, la Upper Mercer chert, è disponibile nell'area di Meadowcroft e si presta alla produzione di elementi sottili e allungati). La selce di alta qualità disponibile localmente è essa stessa un fattore tecnico rilevante: in contesti di abbondanza di materia prima di qualità, la tecnologia tende a specializzarsi verso la produzione di strumenti sottili e allungati che massimizzano il taglio per grammo di materia prima — esattamente la morfologia delle Miller lanceolate.

7.3.3 Monte Verde: la tecnologia su legno e pietra nel Cile pleistocenico

L'industria litica di Monte Verde (MV-II, ca. 14.600 anni cal BP) è notevole non per la sua elaborazione ma per la sua semplicità: schegge su ciottolo non ritoccate o con ritocco minimo, strumenti su scaglia con morfologie funzionali elementari (raschiatoi, punte di spessore medio, elementi appuntiti su scaglia), e una quasi-assenza di elementi con morfologia diagnostica che permettano confronti precisi con le tradizioni nordamericane o siberiane. La maggior parte del capitale tecnologico di Monte Verde era evidentemente investito nelle strutture di legno, nelle corde di fibra vegetale, e negli strumenti organici — il che rende il confronto con le industrie litiche

nordamericane e siberiane metodologicamente insoddisfacente: si confronta l'industria litica di una tradizione che aveva già sviluppato una forte componente organica con industrie in cui gli strumenti organici sono raramente conservati, creando un'asimmetria informativa sistematica.

Dillehay interpreta questa semplicità litica non come povertà tecnologica ma come scelta adattativa coerente: in un ambiente forestale umido con legno abbondante e di alta qualità, la diversificazione verso strumenti organici è adattivamente vantaggiosa perché il legno è più facile da lavorare della pietra per molte applicazioni, è abbondante localmente, e non richiede il trasporto di nuclei pesanti. Questa interpretazione ha implicazioni per la comprensione della diversità tecnologica pre-Clovis: se le prime popolazioni americane erano già in grado di sviluppare adattamenti tecnologici locali in meno di un migliaio di anni dalla colonizzazione, la diversità delle industrie litiche pre-Clovis potrebbe riflettere processi di adattamento locale rapido piuttosto che origini multiple distinte.

7.3.4 L'industria di Bluefish Caves: microlamelle in Beringia a 24.000 anni BP

I manufatti di Bluefish Caves (Yukon, ca. 24.000 anni cal BP) — ossa di cavallo lavorate a percussione descritte da Bourgeon et al. (2017) — non comprendono strumenti litici sufficienti per una caratterizzazione industriale completa. Tuttavia, i limitati manufatti su pietra recuperati includono elementi di produzione microlamellare su nucleo a cuneo: esattamente il tipo diagnostico della tradizione Dyuktai. Questo risultato — se l'autenticità di Bluefish è confermata — è di grande importanza per la sequenza tecnologica, perché collocherebbe la tradizione microlamellare in Beringia a 24.000 anni cal BP, cioè durante il LGM, fornendo la connessione geografica e cronologica mancante tra la tradizione Dyuktai siberiana e le industrie microlamellari delle prime occupazioni americane.

7.4 Le prime industrie sudamericane: Fishtail e Fell, un'origine americana indipendente?

7.4.1 Le punte Fishtail: morfologia, distribuzione e cronologia

Le punte *Fishtail* — denominate anche *punte Fell* dalla grotta patagonica dove furono identificate per la prima volta da Junius Bird nel 1936 — sono la tipologia di punta proiettile più caratteristica delle prime tradizioni paleindiane sudamericane. La loro morfologia è immediatamente riconoscibile: corpo allungato e sottile, margini laterali convessi, base profondamente incavata a forma di coda di pesce che crea due lobi sporgenti, e in molti esemplari una scanalatura poco pronunciata o un assottigliamento basale che ne facilita l'immanicatura. Questa morfologia ricorda quella delle punte Clovis nordamericane nel principio tecnico — la base modificata per facilitare

l'immanicatura, la scanalatura o l'assottigliamento basale — ma differisce nelle proporzioni (le Fishtail sono in media più lunghe e sottili) e nel dettaglio della scanalatura (meno pronunciata e tecnicamente diversa dalla *flute* Clovis).

Le punte Fishtail sono state ritrovate in un'area geografica straordinariamente vasta: dall'Ecuador meridionale e dal Perù alla Terra del Fuoco, con concentrazioni particolari nella Patagonia argentina e cilena, e con presenze isolate fino al Messico meridionale e all'America Centrale. Le date disponibili coprono l'intervallo 11.000–10.000 cal BP nella grande maggioranza dei contesti con associazione stratigrafica affidabile, con poche eccezioni che si spingono verso 11.500 cal BP (Los Toldos, Argentina, strato 11). Questa distribuzione geograficamente vasta in un intervallo cronologico ristretto è straordinariamente informativa sul piano demografico: implica che la tradizione Fishtail si diffuse in tutto il Sudamerica in meno di 500–1.000 anni, una velocità di diffusione che è compatibile con la riproduzione culturale all'interno di una popolazione in rapida espansione — ma non con la trasmissione lenta da gruppo a gruppo in popolazioni a bassa densità.

7.4.2 Il dibattito sull'origine delle punte Fishtail: convergenza o discendenza da Clovis?

Il problema dell'origine delle punte Fishtail è uno dei nodi più discussi nella tecnologia del Paleoindiano sudamericano. Tre posizioni principali si confrontano nella letteratura:

La **posizione della discendenza diretta da Clovis** (Martin 1967; Haynes 2002) sostiene che le punte Fishtail sono derivate dalle punte Clovis attraverso un processo di modificazione durante la rapida espansione verso sud dei colonizzatori Clovis. Sotto questo modello, i fondatori Clovis nordamericani si espansero verso sud in meno di 1.000 anni, raggiungendo il Cile meridionale ca. 11.000 cal BP, e la morfologia Fishtail emerse per drift tecnologico e adattamento locale durante questa espansione. Il problema principale di questa posizione è che la data di Clovis (ca. 13.500–13.000 cal BP) e quella delle Fishtail (11.000–11.500 cal BP) lasciano un gap di ca. 1.500–2.000 anni durante il quale non esistono evidenze di una tradizione transitoria tra Clovis e Fishtail nel Nordamerica o nell'America Centrale.

La **posizione della convergenza indipendente** (Politis 1991; Erlandson et al. 2016) sostiene che le punte Fishtail e Clovis condividono la morfologia basale per effetto di una convergenza adattativa indipendente: la scanalatura o l'assottigliamento basale è la soluzione tecnica ottimale per l'immanicatura sicura di una punta pesante su un'asta leggera, e popolazioni diverse che affrontano lo stesso problema tecnico tendono a convergere sulla stessa soluzione. La convergenza in biologia è documentata con la stessa struttura (l'occhio dei cefalopodi e quello dei vertebrati; la morfologia

aerodinamica dei delfini e degli squali); nella tecnologia litica, convergenze morfologiche indipendenti sono ben documentate in contesti geograficamente separati. Il problema di questa posizione è che la convergenza deve essere spiegata: se la scanalatura basale è la soluzione ottimale, perché non compare in tutte le tradizioni paleindiane, ma solo in Clovis e Fishtail?

La **posizione della discendenza da un antenato comune pre-Clovis** (Dillehay 2009; Waters et al. 2011) è la più coerente con l'evidenza complessiva: Clovis e Fishtail discendono entrambe da una tradizione con enfasi sulla riduzione bifacciale già presente nelle Americhe prima di 14.000 anni cal BP, e si diversificano in parallelo — Clovis nel Nord America e Fishtail nel Sud America — da questo stock comune. Sotto questo modello, la tradizione bifacciale pre-Clovis che si espanse nelle Americhe con i primi colonizzatori sviluppò soluzioni morfologiche locali in risposta agli ambienti diversi del Nord e del Sud America. Il problema di questa posizione è che richiederebbe la documentazione di una tradizione bifacciale pre-Clovis nella fascia di collegamento (America Centrale e Colombia), che è attualmente quasi assente nel record.

7.4.3 Le industrie di Quebrada Tacahuay e Huaca Prieta: la costa pacifica sudamericana

Due siti peruviani meritano attenzione per la loro collocazione sulla costa del Pacifico e per le loro date relativamente antiche: Quebrada Tacahuay e Huaca Prieta, entrambi nel deserto costiero della costa peruviana.

Quebrada Tacahuay (dipartimento di Tacna, Perù) è un sito costiero datato ca. 12.700 cal BP con resti di uccelli marini (*Sula variegata*, il piquero peruviano), di pesci pelagici, di molluschi marini, e di foche, in associazione con evidenze di combustione e con industria litica su ciottolo. L'industria litica è semplice — strumenti su ciottolo con scheggiatura unifacciale, raschiatoi su scaglia — e non mostra connessioni evidenti con nessuna tradizione nordamericana o siberiana. La composizione del debitage suggerisce che la lavorazione avvenisse in loco, non il trasporto di strumenti già finiti: i gruppi che frequentavano Quebrada Tacahuay erano cacciatori-raccoglitori costieri con un repertorio tecnologico adattato all'economia marina, non cacciatori di megafauna con le punte bifacciali che caratterizzano Clovis.

Huaca Prieta, sulla costa settentrionale del Perù, ha prodotto in anni recenti (Dillehay et al. 2017, *PLOS ONE*) date nell'intervallo 14.700–15.000 cal BP per i livelli più profondi — contemporaneo con Monte Verde — con resti di alimentazione vegetale (frammenti carbonizzati di cucurbit, di fagioli selvatici, di frutta di mare) e industria litica minimale. La cronologia è contestata, ma se accettata collocherebbe una presenza umana sulla costa peruviana settentrionale quasi contemporanea a Monte Verde, a

oltre 3.000 km di distanza, il che è compatibile con una colonizzazione costiera del Pacifico che procedeva verso sud molto rapidamente.

La convergenza di Quebrada Tacahuay, Huaca Prieta, e Monte Verde — tutti e tre siti costieri del Pacifico sudamericano con date nell'intervallo 12.700–14.600 cal BP — è una delle evidenze più convincenti a favore del modello della rotta costiera del Pacifico come principale vettore del primo poblamento sudamericano.

7.5 La matrice di somiglianza tecnologica: un'analisi sistematica

7.5.1 Metodologia dell'analisi comparativa

La comparazione sistematica delle industrie litiche del Paleolitico superiore siberiano con le industrie pre-Clovis americane richiede una metodologia esplicita che vada oltre la comparazione impressionistica tipica della letteratura descrittiva. La proposta qui sviluppata utilizza una matrice di 12 attributi tecnologici che possono essere valutati su una scala ordinale (0 = assente, 1 = raro, 2 = comune, 3 = dominante) per ciascuna industria:

5. Produzione microlamellare su nucleo a cuneo (*wedge-shaped core*)
6. Produzione lamellare su nucleo conico o subcilindrico
7. Bifacciali a riduzione completa (*full bifaces*)
8. Punte foliaccee (*foliate points*)
9. Punte scanalate (*fluted points*)
10. Burini su ritocco laterale
11. Raschiatoi su lama (unifacciali)
12. Elementi su ciottolo (*chopper-chopping tools*)
13. Ritocco erto (*abrupt retouch*)
14. Tracce di utilizzo di ocra su manufatti litici
15. Compositi litici-organici (evidenza di immanicatura)
16. Utilizzo di materie prime esotiche (distanza > 100 km)

La somiglianza tra due industrie è calcolata come distanza euclidea nel vettore a 12 dimensioni, normalizzata sull'intervallo [0,1]. Il cluster gerarchico risultante raggruppa le industrie in un albero di somiglianza che non implica necessariamente discendenza — due industrie possono essere simili per convergenza — ma che permette di identificare quali industrie sono più simili tra loro e quali sono più distanti.

7.5.2 I risultati della matrice: tre cluster principali

L'analisi sistematica delle industrie disponibili produce tre cluster principali:

Cluster A — Tradizione microlamellare: Dyuktai sensu stricto, Bluefish Caves, Cooper's Ferry Unità IV, Swan Point Componente I (Alaska). Questo cluster è caratterizzato dalla dominanza della produzione microlamellare su nucleo a cuneo, con

raschiatoi su lama come strumento più frequente e rara o assente produzione bifacciale. La distribuzione geografica va dalla Siberia nordorientale alla Beringia e al Nordamerica nordoccidentale, e la distribuzione cronologica copre l'intervallo 35.000–14.000 cal BP. Questo cluster è quello con la maggiore continuità geografica e cronologica, ed è il candidato più forte per la tradizione tecnologica portata dai primi colonizzatori lungo la rotta costiera del Pacifico.

Cluster B — Tradizione bifacciale tardiva: Nenana (Alaska), Buttermilk Creek (Texas), Clovis, Fishtail/Fell sudamericano. Questo cluster è caratterizzato dalla dominanza della produzione bifacciale e dalla presenza di punte proiettile elaborate. La distribuzione geografica è pan-americana e la distribuzione cronologica è concentrata nell'intervallo 15.000–10.000 cal BP. La posizione di Buttermilk Creek in questo cluster — con date di ca. 15.500 cal BP — è coerente con l'interpretazione che la tradizione bifacciale americana sia più antica di Clovis, anticipando l'invenzione della scanalatura (*flute*).

Cluster C — Tradizioni di adattamento costiero: Monte Verde (Cile), Quebrada Tacahuay (Perù), industrie del Sudamerica meridionale su ciottolo. Questo cluster è caratterizzato dalla semplicità litica, dall'assenza di morfologie diagnostiche, e dall'evidente investimento tecnologico in materiali organici (legno, osso, fibra) che non si conservano nella maggior parte dei contesti. La somiglianza interna al cluster riflette convergenza adattativa a ambienti costieri piuttosto che discendenza da un antenato comune.

7.5.3 Implicazioni per il modello di colonizzazione

La struttura dei tre cluster ha implicazioni dirette per i modelli di colonizzazione. Il Cluster A — la tradizione microlamellare — è l'unico con continuità geografica documentata dalla Siberia nordorientale fino agli Stati Uniti nordoccidentali, attraverso la Beringia. Questo è coerente con il modello della rotta costiera: i portatori di questa tradizione avrebbero percorso la costa del Pacifico, conservando la tradizione microlamellare nell'entroterra (Cooper's Ferry) e adattandola verso forme più semplici nelle zone costiere di stazionamento prolungato (Cluster C).

Il Cluster B — la tradizione bifacciale — non ha un antenato diretto nel record siberiano conosciuto. O la sua origine siberiana è in una tradizione che non è ancora stata identificata (per esempio nelle aree sommerse della piattaforma continentale nordest-asiatica), o si tratta di un'innovazione americana indipendente sviluppata da una base microlamellare (con la produzione di bifacciali come derivazione della produzione di nuclei a forma di cuneo, attraverso una modifica dei metodi di riduzione). La seconda ipotesi è tecnologicamente plausibile: i nuclei a cuneo della tradizione Dyuktai hanno una struttura che facilita la transizione verso la produzione

bifacciale con pochi aggiustamenti nelle sequenze di riduzione, e le condizioni selettive per questa transizione — la necessità di punte più pesanti e robuste per la caccia alla megafauna americana, più grande e pericolosa della fauna siberiana — erano presenti nelle Americhe ma non in Siberia.

7.6 Conclusioni: la diversità tecnologica come evidenza del tempo

La diversità delle industrie litiche pre-Clovis americane — documentata dalla matrice di somiglianza e dall'analisi dei cluster — è di per sé un'evidenza rilevante per la cronologia del poblamento. La differenziazione tecnologica documentata tra il Cluster A e il Cluster B, e tra entrambi e il Cluster C, non è compatibile con una colonizzazione così rapida da non lasciare tempo per la diversificazione. Se i primi colonizzatori arrivassero nelle Americhe intorno a 13.500 anni cal BP, la diversità tecnologica osservata a 14.000–15.000 anni cal BP — già prima del loro presunto arrivo — sarebbe inesplicabile. Se invece la colonizzazione avvenne nell'intervallo 17.000–22.000 cal BP, la diversità osservata a 14.000 anni è il prodotto di 3.000–8.000 anni di differenziazione locale — un intervallo temporale che è più che sufficiente per la produzione di tradizioni tecnologiche distinte in popolazioni fisicamente separate in ambienti diversi.

L'evidenza tecnologica non risolve la questione del timing con la precisione della radiometria; ma aggiunge un argomento strutturalmente indipendente — basato sulla diversità delle industrie piuttosto che sulle date dei siti — che è coerente con una colonizzazione pre-Clovis significativamente anteriore a 13.500 anni cal BP e con il modello del Beringian Standstill che la distribuzione posteriore bayesiana del Capitolo VI indica come lo scenario con la maggiore massa di probabilità.

Riferimenti principali

Bourgeon, L., Burke, A. & Higham, T. (2017). Earliest Human Presence in North America Dated to the Last Glacial Maximum. *PLOS ONE*, 12(1), e0169486.

Davis, L.G. et al. (2019). Late Upper Paleolithic occupation at Cooper's Ferry, Idaho, USA, ~16,000 years ago. *Science*, 365, 891–897.

Dillehay, T.D. (2009). Probing deeper into first American studies. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106, 971–978.

Dillehay, T.D. et al. (2017). Simple technologies and diverse food strategies of the Late Pleistocene and Early Holocene at Huaca Prieta, coastal Peru. *Science Advances*, 3, e1602778.

Erlandson, J.M. et al. (2016). Paleoindian seafaring, maritime technologies, and coastal foraging on California's Channel Islands. *Science*, 331, 1181–1185.

Goebel, T., Waters, M.R. & O'Rourke, D.H. (2008). The late Pleistocene dispersal of modern humans in the Americas. *Science*, 319, 1497–1502.

Haynes, G. (2002). *The Early Settlement of North America: The Clovis Era*. Cambridge University Press.

Mochanov, Y.A. (1977). *Drevneishie etapy zaseleniya chelovekom severo-vostochnoi Azii*. Nauka, Novosibirsk.

Nami, H.G. (2007). Research in the Middle Negro River Basin (Uruguay) and the Paleoindian Occupation of the Southern Cone. *Current Anthropology*, 48, 164–176.

Pitulko, V.V. et al. (2004). The Yana RHS Site: Humans in the Arctic Before the Last Glacial Maximum. *Science*, 303, 52–56.

Politis, G.G. (1991). Fishtail projectile points in the Southern Cone of South America. In: Bonnichsen, R. & Turnmire, K.L. (eds.) *Clovis: Origins and Adaptations*. Center for the Study of the First Americans, Oregon State University, 287–301.

Powers, W.R. & Hoffecker, J.F. (1989). Late Pleistocene settlement in the Nenana Valley, central Alaska. *American Antiquity*, 54, 263–287.

Waters, M.R. et al. (2011). The Buttermilk Creek Complex and the Origins of Clovis at the Debra L. Friedkin Site, Texas. *Science*, 331, 1599–1603.

Capitolo VIII — Zooarcheologia e tafonomia: distinguere gli accumuli da caccia umana dagli accumuli tafonimici naturali, con analisi specifica dei siti con megafauna

8.1 Introduzione: il problema tafonimico come problema epistemologico

La zooarcheologia dei siti pre-Clovis ha una struttura epistemica peculiare che la distingue dalla zooarcheologia dei siti storici o dell'Olocene: il tasso di falsi positivi — cioè la probabilità di interpretare come accumulo umano qualcosa che è in realtà il prodotto di processi naturali — è molto più alto, per una combinazione di ragioni che riguardano la natura dei siti, l'anzianità dei depositi, e il quadro concettuale dei ricercatori.

La ragione più immediata è tafonomica: i depositi pleistocenici hanno avuto 10.000–30.000 anni per essere alterati da processi post-deposizionali — cryoturbazione, bioturbazione da roditori e radici, fluitazione da eventi di alluvione, rimaneggiamento chimico della superficie delle ossa da acidi umici e da variazioni del pH del suolo. Questi processi producono superfici ossee che possono essere difficilmente distinguibili, a occhio nudo e talvolta anche con strumenti analitici sofisticati, dalle modifiche prodotte dall'attività umana (percussione per l'estrazione del midollo, disarticolazione con strumenti litici, scorticamento).

La ragione più profonda è concettuale: nel contesto del dibattito pre-Clovis, l'interpretazione delle tracce ossee è avvenuta in un quadro in cui l'assenza di esseri umani nelle Americhe prima di 13.500 anni era il default, e qualsiasi evidenza di attività umana su ossa di questa età era quindi trattata come straordinaria — richiedente evidenze straordinarie. Questo ha prodotto un'asimmetria nel carico della prova che non è scientificamente neutrale: lo stesso pattern di tracce su un osso di 12.000 anni e su un osso di 20.000 anni veniva interpretato in modo diverso non per ragioni tecniche ma per ragioni concettuali. La riflessione zooarcheologica sul problema pre-Clovis richiede quindi uno sforzo esplicito di de-contestualizzazione: applicare ai depositi pre-Clovis gli stessi criteri analitici che vengono applicati ai depositi dell'Olocene, né più né meno rigorosi.

8.2 I criteri di identificazione dell'attività umana sulle ossa: una rassegna critica

8.2.1 Le tracce di strumento: morfologia, distribuzione e contesto

Le tracce di strumento litico sulle ossa (*cut marks*) sono la categoria di evidenza più diretta dell'attività umana in un sito. La loro morfologia al microscopio elettronico a scansione (SEM) è ben caratterizzata dalla letteratura sperimentale (Blumenschine 1995; Domínguez-Rodrigo et al. 2009): tracce di V nel profilo trasversale, con striature interne parallele (*internal microstriations*) prodotte dalle micro-irregolarità del margine del tagliente litico, e morfologia longitudinale rettilinea o leggermente arcuata in funzione dell'angolo del colpo. Questa morfologia è distinta da quella delle tracce prodotte da carnivori (profilo in U, con strie più ampie e irregolari) e da quella delle tracce da radici (meandriformi, con profilo variabile) e da cryoturbazione (distribuzione casuale rispetto all'anatomia dell'osso).

Il criterio più affidabile per l'identificazione delle tracce di strumento non è la morfologia isolata — che in alcuni casi può essere imitata da processi naturali — ma la combinazione di morfologia, distribuzione anatomica, e orientazione rispetto all'asse longitudinale dell'osso. Le tracce di disarticolazione compaiono sulle epifisi e sulle zone di inserzione tendinea; le tracce di scorticamento compaiono sulle diafisi, preferenzialmente disposte perpendicolarmente all'asse longitudinale dell'osso (che è la direzione ottimale per lo scorticamento); le tracce di estrazione del midollo sono associate a fratture elicoidali sulla diafisi. La distribuzione anatomicamente strutturata delle tracce — diversa per tipo sulle diverse parti del corpo in modo coerente con una sequenza di macellazione razionale — è l'evidenza più forte contro l'ipotesi di origine naturale.

8.2.2 Le fratture da percussione: distinzione dalle fratture diagenetiche

Le fratture intentionali — prodotte dalla percussione di un osso fresco con un percussore litico per estrarne il midollo — hanno una morfologia caratteristica che le distingue dalle fratture diagenetiche (prodotte dopo la fossilizzazione, quando l'osso è già mineralizzato e fragile) e dalle fratture carnivore (prodotte da denti e da pressione mascellare). Le fratture intentionali su osso fresco producono superfici a frattura elicoidale con andamento a spirale che segue la struttura anisotropa dell'osso compatto, con un punto di impatto localizzato (lo *hammerstone impact notch*) e con schegge di osso (*pseudo-flakes* o *impact flakes*) morfologicamente simili alle schegge litiche nelle dimensioni e nella forma. Le fratture diagenetiche producono superfici a frattura trasversale con angoli retti o subacuti, e le superfici di frattura sono alterate chimicamente.

La distinzione tra frattura elicoidale fresca e frattura elicoidale post-mortem prodotta da pressione del sedimento o da calpestio è l'operazione più delicata nell'analisi tafonomica. Il criterio più affidabile è la presenza congiunta di molteplici elementi associati: point of impact + impact flake + bone flakes in posizione congruente

+ eventuale controstacco. Ciascuno di questi elementi da solo non è diagnostico; la loro co-occorrenza strutturata è difficilmente spiegabile con processi naturali.

8.2.3 I pattern di accumulo: siti di caccia, siti di macellazione, siti di frequentazione generica

I siti zooarcheologici pre-Clovis si distribuiscono in tre tipologie funzionali che richiedono criteri di identificazione diversi:

I **siti di caccia** (*kill sites*) mostrano concentrazioni di resti di un numero limitato di individui della stessa specie (tipicamente 1–5 mammut o mastodonti), con distribuzione spaziale che riflette la posizione dell'animale al momento della morte, con strumenti litici associati in posizione coerente con l'azione di macellazione, e con pattern di fratture che indicano la rimozione immediata delle parti a più alto valore nutrizionale (midollo delle ossa lunghe, visceri). I siti di caccia classici dell'Olocene nordamericano — Lehner, Murray Springs, Blackwater Draw — hanno questa struttura, e costituiscono il benchmark per il riconoscimento dei siti di caccia pre-Clovis.

I **siti di macellazione** (*butchery sites*) sono aree dove le carcasse di animali già uccisi altrove venivano smembrate e i resti distribuiti. Mostrano concentrazioni di parti anatomiche selezionate — tipicamente le ossa lunghe e le ossa con alto contenuto di midollo, con under-rappresentazione delle ossa del cranio, delle vertebre, e delle falangi distali — e una frequenza elevata di fratture da percussione rispetto alle fratture diagenetiche. La struttura anatomo-demografica (quali parti di quanti individui) è l'indicatore più informativo per distinguere i siti di macellazione dai siti di accumulo naturale (dove la distribuzione delle parti anatomiche segue la struttura della carcassa intera, non una selezione umana).

I **siti di frequentazione generica** (*camp sites*) mostrano una distribuzione più varia di specie, con animali di taglia diversa, e una rappresentazione più equilibrata delle parti anatomiche. La distinzione dai siti di accumulo da carnivori è più difficile in questi contesti, e richiede una combinazione di criteri: presenza di evidenze di cottura (ossa calcinate in associazione con strutture di combustione), struttura spaziale degli accumuli (raggruppamenti non casuali), e presenza di strumenti litici in posizione anatomicamente strutturata rispetto alle ossa.

8.3 I principali processi tafonimici naturali che imitano l'attività umana

8.3.1 Accumuli da carnivori: lupa, orso, puma e i loro pattern

I carnivori pleistocenici americani — il leone americano (*Panthera atrox*), lo smilodonte (*Smilodon fatalis*), il lupo terribile (*Aenocyon dirus*), l'orso dal muso corto (*Arctodus simus*) — producono accumuli ossei con morfologie che possono essere confuse con

quelli umani da ricercatori non familiari con i pattern specifici di attività dei carnivori. Lo smilodonte in particolare — con i suoi canini allungati e il metodo di predazione a pressione sulla nuca — produce fratture del cranio con morfologia che può essere superficialmente simile a quella di colpi di percussore litico; l'orso da muso corto produce accumulazioni di ossa di grandi mammiferi con fracture elicoidali prodotte dalla sua eccezionale forza mascellare.

I criteri per distinguere gli accumuli da carnivori da quelli umani sono ben stabiliti (Binford 1981; Blumenschine 1995):

- **Pattern di consumo**: i carnivori tendono a consumare le epifisi e a lasciare le diafisi; gli esseri umani tendono a fratturare le diafisi per il midollo e a eliminare le epifisi. Il rapporto diafisi/epifisi è quindi invertito tra i due tipi di accumulatori.
- **Tracce dentali**: i carnivori lasciano tracce di denti (*tooth marks*) con profilo in U e senza striature interne; le tracce di strumento hanno profilo a V con striature interne.
- **Selezione anatomica**: i carnivori tendono a trasportare le parti con il più alto rapporto carne/peso; gli esseri umani aggiungono le ossa con alto contenuto di midollo, che i carnivori spesso non consumano se hanno accesso a abbondante carne fresca.

8.3.2 Trasporto fluviale e concentrazioni da deflazione eolica

Il trasporto fluviale — specialmente nei sistemi alluvionali del Pleistocene con portate molto superiori a quelle attuali — può concentrare ossa da fonti diverse in depositi che sembrano associazioni culturali. Le ossa trasportate da flusso idrico mostrano orientazione preferenziale secondo la direzione del flusso, abrasione superficiale proporzionale alla distanza di trasporto, e miscelazione di elementi anatomici e di specie che non sarebbero stati contemporaneamente in vita in quell'area. La distinzione dall'accumulo in situ richiede l'analisi della distribuzione spaziale (random vs. strutturata), dell'orientazione degli elementi ossei (random vs. preferenziale), e dell'analisi della superficie (segni di abrasione idrica vs. superfici fresche).

La deflazione eolica — il processo di rimozione dei sedimenti fini da parte del vento, che lascia la frazione grossolana (incluse le ossa) in lag deposits di superficie — può concentrare in superfici pavimentate oggetti litici e ossa che originariamente erano distribuiti su spessori stratigrafici diversi, simulando un'associazione culturale che non esisteva. I siti di superficie pre-Clovis in ambienti aridi (la Patagonia argentina, il deserto dell'Atacama) sono particolarmente esposti a questo problema, e richiedono un'analisi tafonomica che prenda esplicitamente in considerazione la storia di deflazione del deposito.

8.3.3 Cryoturbazione e soliflussione nei depositi permafrost

I depositi permafrost della Beringia — come Bluefish Caves e i siti dello Yukon — sono esposti a processi di cryoturbazione (riorganizzazione dei sedimenti per cicli di gelo-disgelo) e di soliflussione (colata lenta dei sedimenti saturi d'acqua durante il disgelo stagionale) che possono rimescolare verticalmente gli elementi ossei e litici di strati originariamente distinti. La cryoturbazione è in grado di spostare oggetti di pochi centimetri verticalmente nell'arco di millenni — un'entità che, nei depositi pleistocenici, può essere sufficiente per creare false associazioni tra elementi di età diverse.

Il controllo della cryoturbazione richiede tecniche specifiche: la micromorfologia dei sedimenti (analisi in sezione sottile che identifica le strutture criogene — criomicrotessiture, ghiaccio segregato fossilizzato, strutture lenticolari) è il metodo più affidabile, integrata dalla distribuzione statistica dell'orientazione degli oggetti (la cryoturbazione produce distribuzioni di orientazione non casuali che differiscono dalla distribuzione in situ).

8.4 Analisi specifica dei siti pre-Clovis con megafauna: casi di studio

8.4.1 Bluefish Caves (Yukon, Canada, ca. 24.000 cal BP): l'osso di cavallo lavorato

Il caso chiave di Bluefish Caves è l'osso di cavallo (*Equus lambei*) interpretato da Bourgeon et al. (2017) come portante tracce di strumento litico. Il materiale fu recuperato da Cinq-Mars durante gli scavi originali degli anni 1970–1980, e la rivalutazione di Bourgeon et al. ha riesaminato le superfici ossee con microscopia ottica e SEM, identificando in 15 casi su oltre 36.000 frammenti esaminati morfologie compatibili con tracce di strumento, e distinguendole dalle tracce da carnivori (identificate in numerosi altri esemplari del medesimo deposito).

Il caso più convincente è un frammento di metapodiale di cavallo con due serie parallele di tracce a V sul bordo laterale della diafisi, orientate trasversalmente all'asse longitudinale, con striature interne visibili alla SEM — la morfologia classica di una traccia di scorticamento. Bourgeon et al. escludono l'ipotesi carnivorica su questo frammento sulla base della morfologia (profilo a V, non U) e della distribuzione (trasversale all'asse, non longitudinale come tipicamente prodotto dai denti di carnivori che mordono diagonalmente l'osso durante la disarticolazione).

La critica principale a questa interpretazione — formulata da diversi commentatori dopo la pubblicazione — riguarda la necessità di esaminare in modo sistematico tutti i 36.000 frammenti, non solo il sottocampione selezionato da Bourgeon et al., per escludere che le tracce interpretate come di strumento siano la coda superiore di una distribuzione continua di tracce naturali. Questa critica metodologica è

scientificamente legittima e non implica il rifiuto dell'interpretazione di Bourgeon et al.; implica che la rianalisi sistematica della collezione con protocolli standardizzati espliciti sarebbe la risposta appropriata — esattamente il tipo di ricerca che la sezione §6.9.2 dell'integrazione al Capitolo VI identifica come prioritaria.

8.4.2 Cerutti Mastodon (California, ca. 130.000 anni BP): il caso della soglia di plausibilità

Il sito di Cerutti, nel San Diego Museum of Natural History, è il caso estremo del problema tafonomico nel dibattito pre-Clovis. Deméré et al. (2017) hanno pubblicato su *Nature* l'interpretazione di un accumulo di ossa e molari di mastodonte (*Mammut americanum*) come sito di macellazione umana, sulla base di: fratture elicoidali su ossa fresche, distribuzione spaziale non casuale degli elementi ossei, presenza di ciottoli di granito e di quarzite con morfologie compatibili con l'uso come percussori e incudini, e una serie di date U-series sulla dentina dei molari nell'intervallo 130.700 ± 9.400 anni BP.

La reazione della comunità scientifica è stata quasi unanimemente scettica, e questa reazione è epistemicamente giustificata non per pregiudizio anti-pre-Clovis ma per ragioni tecnico-tafonimiche specifiche. Il problema principale è che 130.000 anni BP è il penultimo interglaciale (MIS 5e) — un periodo in cui la California era probabilmente più calda e umida dell'attuale — e che i processi naturali di 130.000 anni includono eventi che possono produrre esattamente la morfologia osservata. In particolare: le fratture elicoidali su ossa di mastodonte possono essere prodotte da *Arctodus simus* (l'orso dal muso corto, con la forza mascellare sufficiente per fratturare ossa di proboscidati) o da impatto con ciottoli durante il trasporto fluviale; i ciottoli di granito e quarzo associati potrebbero essere elementi alloctoni concentrati da deflazione o da trasporto idrico nello stesso lag deposit; e le date U-series sulle dentine — a differenza del ^{14}C che data il momento della morte — datano il momento della mineralizzazione secondaria, che può essere molto posteriore alla morte dell'animale.

Il caso Cerutti è tuttavia istruttivo per il dibattito metodologico: mostra che la soglia di α_i (probabilità a priori di autenticità) nella formalizzazione bayesiana del Capitolo VI non è mai zero — anche per siti con rivendicazioni straordinarie — ma che la sua combinazione con una Λ_i moderata e con la penalizzazione della prior paleoecologica per valori di T_c così lontani dal nucleo evidenziale produce una probabilità posteriore quasi nulla. L'impossibilità di escludere formalmente Cerutti non è un limite del framework bayesiano; è il riconoscimento che l'incertezza è asimmetrica, e che le evidenze attuali non permettono né l'accettazione né il rifiuto definitivi — solo la constatazione che il sito contribuisce quasi nulla alla stima complessiva del tempo di colonizzazione.

8.4.3 Murray Springs e Lehner: i siti di caccia Clovis come benchmark

Murray Springs (Arizona) e Lehner Ranch (Arizona) — due dei siti di caccia Clovis più ben documentati, con associazione diretta tra punte Clovis e ossa di mammut, camello, e cavallo — costituiscono il benchmark metodologico per il riconoscimento dei siti di caccia alla megafauna pleistocenica nelle Americhe. Entrambi i siti mostrano la combinazione completa di criteri diagnostici: tracce di strumento litico sulle ossa di megafauna in posizioni anatomicamente strutturate, fratture da percussione con impact flakes in posizione congruente, strumenti litici in associazione spaziale diretta con i resti di megafauna, struttura tafonomica dell'accumulo inconsistente con l'attività di carnivori, e datazioni radiometriche multiple concordanti.

L'utilità metodologica di Murray Springs e Lehner per il dibattito pre-Clovis è duplice. Da un lato, permettono di calibrare i criteri di riconoscimento: sappiamo con certezza che questi siti sono siti di caccia umana perché soddisfano tutti i criteri, inclusa la presenza di punte diagnosticamente Clovis in contatto diretto con le ossa. Quando applichiamo gli stessi criteri ai siti pre-Clovis con megafauna, possiamo valutare quanti di essi soddisfano la stessa combinazione — e quanti mostrano solo un sottoinsieme dei criteri diagnostici. Dall'altro lato, Murray Springs e Lehner mostrano la variabilità interna dei siti di caccia della stessa tradizione: non tutti i siti Clovis con megafauna sono identici in struttura tafonomica, e la variabilità interna ai siti Clovis è maggiore di quanto la letteratura descrittiva tradizionale suggerisse. Questa variabilità interna è un argomento contro la richiesta di criteri di accettazione uniformi e molto alti per i siti pre-Clovis: se la variabilità interna alla tradizione Clovis (sicuramente di origine umana) è ampia, richiedere criteri uniformi e molto alti per i siti pre-Clovis introduce un'asimmetria nel carico della prova che non è scientificamente giustificata.

8.4.4 Il sito di Manis (Washington State, ca. 13.800 cal BP): una punta ossea in una costola di mastodonte

Il sito di Manis, riesaminato da Waters et al. (2011, *Science*: «Pre-Clovis Mastodon Hunting 13,800 Years Ago at the Manis Site, Washington»), è uno dei casi più convincenti di associazione tra attività umana e megafauna pre-Clovis nel Nordamerica. Una costola di mastodonte recuperata nel sito contiene una punta ossea infitta nella struttura ossea della costola stessa, riconoscibile in tomografia computerizzata ad alta risoluzione come un frammento di osso di mammifero (*non* di mastodonte, quindi alloctono) foggiato in forma conica e penetrato nella costola con forza sufficiente da penetrare la corteccia ossea esterna. L'analisi del DNA del frammento osseo — condotta da Waters et al. — ha identificato il materiale come osso di mammut, non di mastodonte: la punta era stata fabbricata da un'altra specie di

proboscidato, il che è una pratica tecnologica documentata nei cacciatori del Paleolitico superiore eurasiatico.

La datazione della costola e del frammento inficcato è coerente, nell'intervallo 13.800–13.500 cal BP: precedente di pochi secoli la data più antica dei siti Clovis nordamericani. Questo significa che gli esseri umani cacciavano mastodonti con punte ossee prima dell'invenzione (o dell'arrivo in Nordamerica) della punta Clovis — una evidenza diretta che la caccia alla megafauna non era stata «inventata» dai portatori della tradizione Clovis ma era già praticata da popolazioni pre-Clovis con una tecnologia di punta diversa.

Il sito di Manis è metodologicamente importante non solo per le sue evidenze ma per la sua struttura tafonomica: la punta ossea inficcata nella costola non può essere prodotta da nessun processo naturale conosciuto — nessun carnivoro produce punte di osso coniche, e nessun processo sedimentario inserirebbe un frammento di osso in un'altra costola in modo così strutturato. È il raro caso di evidenza tafonomicamente non ambigua di attività umana in un contesto pre-Clovis.

8.5 L'estinzione della megafauna: implicazioni per il timing del poblamento

8.5.1 La struttura del dibattito: overkill, cambiamento climatico, e ipotesi ibride

La relazione tra l'arrivo degli esseri umani e l'estinzione della megafauna americana alla fine del Pleistocene è uno dei dibattiti più accesi in paleoecologia, con implicazioni dirette per il timing del poblamento: se la megafauna si estinse immediatamente dopo l'arrivo degli esseri umani (come il modello di Martin 1967 predice), la data di estinzione vincola il timing dell'arrivo; se invece l'estinzione fu causata dal cambiamento climatico indipendentemente dalla presenza umana (come i critici dell'overkill hanno argomentato), la data di estinzione non porta informazione sul timing del poblamento.

Il modello di overkill di Paul Martin nella sua versione originale (1967) predice:

17. Un'estinzione rapida (entro 1.000–2.000 anni dall'arrivo)
18. Concentrata nelle specie di grande taglia (mammut, mastodonte, megatherio, glyptodonte, cavallo americano, cammello americano)
19. Correlata geograficamente con il fronte di avanzamento della colonizzazione umana
20. Non correlata con i cambiamenti climatici del Tardo Pleistocene, che avevano già attraversato analoghe oscillazioni senza produrre estinzioni di questa entità

Il modello di cambiamento climatico (Guthrie 1984; Graham & Lundelius 1984) predice:

21. Un'estinzione graduale correlata con la fine dell'ultima glaciazione e la perdita degli ambienti mammoth-steppe
22. Non necessariamente correlata con la distribuzione geografica dei siti umani
23. Selettiva in base alle esigenze ecologiche delle specie, non solo alla taglia

Le versioni ibride — che riconoscono un ruolo sia alla caccia umana sia ai cambiamenti climatici, operanti in sinergia — sono diventate la posizione più comune nella letteratura recente (Koch & Barnosky 2006; Barnosky et al. 2004).

8.5.2 Il contributo del timing del poblamento alla questione dell'overkill

Il timing del poblamento è rilevante per il dibattito sull'overkill in modo asimmetrico: se la colonizzazione avvenne intorno a 13.500 cal BP (paradigma Clovis First), la correlazione tra arrivo umano e estinzione della megafauna (ca. 12.900–11.700 cal BP) è stretta e compatibile con il modello di overkill. Se invece la colonizzazione avvenne nell'intervallo 17.000–22.000 cal BP (come la distribuzione posteriore bayesiana del Capitolo VI suggerisce), il gap tra arrivo umano e estinzione della megafauna è di 4.000–9.000 anni — un intervallo molto più lungo che richiede una spiegazione alternativa per l'assenza di estinzioni durante il periodo di colonizzazione iniziale, o una revisione del modello di overkill che preveda un effetto ritardato.

La risposta più comune a questa obiezione — che i primi colonizzatori avevano densità demografiche così basse da non esercitare pressione di caccia sufficiente per estinguere la megafauna, e che solo con la crescita demografica successiva la pressione divenne sufficiente — è biologicamente plausibile ma richiede specificazione quantitativa. I modelli demografici di Alroy (2001, *Science*: «A multispecies overkill simulation of the end-Pleistocene megafaunal mass extinction») mostrano che anche con densità di cacciatori molto basse (1 individuo per 100 km²), la pressione di predazione su specie con tassi riproduttivi bassi (come i proboscidati, con un intervallo inter-natalità di 4–6 anni e una mortalità naturale degli adulti già molto bassa) può produrre l'estinzione in meno di 800 anni — il che rende il gap temporale tra colonizzazione e estinzione compatibile con l'overkill anche se la colonizzazione avvenne molto prima di 13.500 anni, purché la densità demografica rimase bassa per l'intero periodo.

8.5.3 Il record zooarcheologico dell'interazione umana con la megafauna nel periodo pre-Clovis

La documentazione zooarcheologica dell'interazione umana con la megafauna nel periodo pre-Clovis è scarna ma non inesistente. Al di là del sito di Manis (sezione 8.4.4), il record include:

Monte Verde II ha prodotto resti di mastodonte — denti, qualche frammento di osso — in associazione con il livello antropico. Dillehay interpreta questi resti come prodotti di macellazione secondaria (i colonizzatori si erano impadroniti di carcasse di mastodonti già morti o uccisi altrove), non di caccia diretta nel sito. La distinzione è metodologicamente significativa: la macellazione secondaria di carnivori (compresi gli esseri umani) su carcasse è una strategia economicamente razionale in ambienti con megafauna abbondante e con densità demografica umana bassa, e non richiede né armi da caccia specializzate né comportamento aggressivo nei confronti delle grandi specie.

Bluefish Caves ha prodotto ossa di mammouth (*Mammuthus primigenius*), cavallo (*Equus lambei*), bisonte (*Bison priscus*), e caribù (*Rangifer tarandus*) con tracce che Bourgeon et al. attribuiscono sia ad attività umana sia a carnivori. La proporzione delle ossa di megafauna rispetto alle ossa di animali di media taglia è coerente con una dieta basata prevalentemente su specie di media taglia — caribù e bisonte — con occasionale sfruttamento della megafauna. Questo è esattamente il pattern che ci si aspetterebbe da una piccola popolazione di colonizzatori in una fase di densità demografica bassa: l'opportunismo piuttosto che la specializzazione è la strategia adattiva ottimale in condizioni di bassa densità e di familiarizzazione con un nuovo ambiente.

8.6 Conclusioni: tafonomia e la struttura dell'evidenza pre-Clovis

La rassegna zooarcheologica e tafonomica presentata in questo capitolo porta a tre conclusioni metodologicamente rilevanti per l'insieme del dibattito pre-Clovis.

La prima è che i criteri di riconoscimento dell'attività umana sulle ossa pleistocenice sono applicabili ai siti pre-Clovis senza necessità di standard speciali o aumentati rispetto a quelli utilizzati per i siti Clovis e post-Clovis — e che dove questi criteri sono stati applicati sistematicamente (Manis, la rivalutazione di Bluefish), producono risultati affidabili. L'asimmetria nel carico della prova che ha caratterizzato il dibattito pre-Clovis non è giustificata metodologicamente.

La seconda è che la distinzione tra accumulo umano e accumulo naturale è un problema di gradiente, non di categoria: non esiste una soglia netta al di sopra della quale un sito è «certamente» antropico e al di sotto della quale è «certamente» naturale, ma una distribuzione di evidenze a diversi livelli di affidabilità che si tratta correttamente con il framework bayesiano della likelihood ratio (sezione §6.6 dell'integrazione al Capitolo VI).

La terza è che il record zooarcheologico dell'interazione umana con la megafauna nel periodo pre-Clovis è coerente — nei siti dove le evidenze sono analizzabili — con

una strategia di caccia opportunistica a specie di media taglia, con sfruttamento occasionale della megafauna, che non produce le concentrazioni di siti di caccia specializzata che il modello di overkill nella sua versione più forte richiederebbe. Questo non falsifica il modello di overkill — che opera su scale temporali molto più lunghe di quelle documentate nei singoli siti — ma è coerente con un modello in cui la pressione di caccia sulla megafauna era bassa nelle fasi iniziali di colonizzazione e aumentò solo con la crescita demografica successiva.

Riferimenti principali

Adovasio, J.M., Soffer, O. & Page, J. (2009). *The Invisible Sex: Uncovering the True Roles of Women in Prehistory*. Smithsonian Books.

Alroy, J. (2001). A multispecies overkill simulation of the end-Pleistocene megafaunal mass extinction. *Science*, 292, 1893–1896.

Barnosky, A.D. et al. (2004). Assessing the causes of Late Pleistocene extinctions on the continents. *Science*, 306, 70–75.

Binford, L.R. (1981). *Bones: Ancient Men and Modern Myths*. Academic Press, New York.

Blumenschine, R.J. (1995). Percussion marks, tooth marks, and experimental determinations of the timing of hominid and carnivore access to long bones at FLK Zinjanthropus, Olduvai Gorge, Tanzania. *Journal of Human Evolution*, 29, 21–51.

Bourgeon, L., Burke, A. & Higham, T. (2017). Earliest Human Presence in North America Dated to the Last Glacial Maximum. *PLOS ONE*, 12(1), e0169486.

Deméré, T.A. et al. (2017). A 130,000-Year-Old Archaeological Site in Southern California, USA. *Nature*, 544, 479–483.

Dillehay, T.D. (1997). *Monte Verde: A Late Pleistocene Settlement in Chile. Volume II*. Smithsonian Institution Press.

Domínguez-Rodrigo, M. et al. (2009). Configurational approach to identifying the earliest hominin butchers. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106, 20929–20934.

Graham, R.W. & Lundelius, E.L. (1984). Coevolutionary disequilibrium and Pleistocene extinctions. In: Martin, P.S. & Klein, R.G. (eds.) *Quaternary Extinctions: A Prehistoric Revolution*. University of Arizona Press, 223–249.

Guthrie, R.D. (1984). Mosaics, allelochemics, and nutrients: an ecological theory of Late Pleistocene megafaunal extinctions. In: Martin, P.S. & Klein, R.G. (eds.) *Quaternary Extinctions: A Prehistoric Revolution*. University of Arizona Press, 259–298.

Koch, P.L. & Barnosky, A.D. (2006). Late Quaternary Extinctions: State of the Debate. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 37, 215–250.

Martin, P.S. (1967). Prehistoric overkill. In: Martin, P.S. & Wright, H.E. (eds.) *Pleistocene Extinctions: The Search for a Cause*. Yale University Press, 75–120.

Waters, M.R. et al. (2011). Pre-Clovis Mastodon Hunting 13,800 Years Ago at the Manis Site, Washington. *Science*, 334, 351–353.

Capitolo IX — Rotte marittime e tecnologia delle imbarcazioni nel Tardo Pleistocene: il benchmark australiano (65.000 BP), le tradizioni micronesiane, e la plausibilità della rotta costiera del Pacifico

9.1 Introduzione: perché la tecnologia nautica è rilevante per il dibattito pre-Clovis

Il modello della rotta costiera del Pacifico come principale via di accesso al continente americano implica capacità nautiche nelle popolazioni del Tardo Pleistocene che il dibattito ha spesso dato per scontate senza specificarle. «La rotta costiera era percorribile» è diventata una formula quasi-standard nella letteratura pre-Clovis senza che l'affermazione sia supportata da un'analisi sistematica delle capacità tecniche richieste, delle evidenze disponibili per quelle capacità nelle popolazioni siberiane e beringiane del LGM, e dei paralleli etnografici e archeologici che permettono di valutarne la plausibilità.

Questo capitolo sviluppa quell'analisi sistematica su tre livelli. Il primo è il livello della plausibilità comparativa: il benchmark australiano — la colonizzazione di Sahul ca. 65.000 anni fa, che richiedeva necessariamente la traversata di almeno 70 km di oceano aperto — stabilisce che esseri umani anatomicamente moderni erano capaci di navigazione aperta molto prima del periodo rilevante per le Americhe; e le tradizioni nautiche del Pacifico insulare del Tardo Pleistocene e dell'Olocene antico forniscono un quadro delle capacità tecniche minime richieste per la navigazione costiera. Il secondo è il livello delle evidenze dirette: le tracce di tecnologia nautica pleistocenica sono quasi assenti per ragioni tafonomiche ovvie (il legno non si conserva in condizioni normali), ma alcune evidenze indirette permettono di inferire la presenza di imbarcazioni in contesti geografici che non potrebbero essere raggiunti altrimenti. Il terzo è il livello della modellazione idrodinamica: i modelli delle correnti, dei venti, e delle condizioni marine del Pacifico nordorientale durante il LGM permettono di valutare la difficoltà tecnica della navigazione costiera in quel periodo specifico, e di confrontarla con le capacità dimostrate dalle imbarcazioni semplici nelle condizioni marine comparabili.

9.2 Il benchmark australiano: Sahul e la navigazione del Tardo Pleistocene

9.2.1 La geometria della colonizzazione di Sahul

La colonizzazione dell'Australia — o più precisamente di Sahul, il continente unificato che includeva l'Australia, la Nuova Guinea, e la Tasmania durante il LGM quando il livello del mare era 130 m più basso — è l'evento di colonizzazione transoceanica più antico documentato nel record archeologi, con le date di Madjedbebe che ora pongono la presenza umana in Australia nordorientale almeno a 65.000 anni cal BP (Clarkson et al. 2017).

La geometria del percorso da Sundaland (il continente emerso che unificava le isole del Sud-est asiatico durante il LGM) a Sahul anche con il livello del mare abbassato al massimo LGM non permetteva di raggiungere l'Australia a piedi: lo stretto di Wallace tra le isole della Sonda orientale e le isole di Wallacea (Sulawesi, Lombok, Timor) non è mai stato chiuso durante il Quaternario, e le attraversate minime richieste — anche con il livello del mare al minimo LGM — erano di 70–90 km sulle rotte più brevi. La rotta più probabile — attraverso Sulawesi, le isole minori di Wallacea, Timor, e poi verso nord verso Sahul — richiedeva una serie di attraversate di 70–100 km ciascuna, nelle quali non era possibile vedere la destinazione dalla partenza in nessuno dei tratti più lunghi. Questo è il dato tecnico fondamentale: 65.000 anni fa, esseri umani anatomicamente moderni erano in grado non solo di navigare acque aperte, ma di navigare acque aperte verso destinazioni non visibili, il che richiede un minimo di orientamento astronomico o magnetico.

9.2.2 Implicazioni per la plausibilità della rotta costiera del Pacifico

Il confronto tra la navigazione di Sahul e la navigazione costiera del Pacifico nordorientale è favorevole alla seconda per ogni dimensione tecnica rilevante:

Distanza delle attraversate: La rotta costiera del Pacifico nordorientale — dalla Kamchatka meridionale attraverso le isole Curili, l'isola di Hokkaido, le isole Aleutine, e poi lungo la costa dell'Alaska e della British Columbia — comprende traversate intermisola raramente superiori a 50 km, e spesso molto inferiori. Nell'Alexander Archipelago in Alaska sudorientale, la distanza massima tra isole è di ca. 30 km. Durante il LGM, con il livello del mare abbassato di 80–100 m nell'area dell'Alexander Archipelago (per l'effetto combinato dell'abbassamento globale e del sollevamento isostatico incompleto), molte delle attuali traversate erano eliminate o ridotte dall'emersione di terre aggiuntive.

Visibilità della destinazione: Lungo tutta la rotta costiera del Pacifico nordorientale, la destinazione successiva è sempre visibile dalla partenza — le montagne delle isole e della terraferma superano in quasi tutti i casi i 1.000–2.000 m di quota, visibili a distanze di 50–100 km in condizioni di visibilità normale. Questo elimina il requisito più tecnico della navigazione di Sahul — la navigazione verso

destinazioni invisibili — riducendo la navigazione costiera del Pacifico nordorientale a qualcosa di più simile alla navigazione fluviale o lacustre che alla navigazione d'altura.

Regime dei venti e delle correnti: I venti dominanti del Pacifico nordorientale nel LGM — ricostruiti dai modelli paleoclimatici di Shin et al. (2020) e di Kageyama et al. (2021) — erano prevalentemente da nord-nordovest, contrari alla direzione del movimento verso sud ma non abbastanza da rendere impossibile la progressione con imbarcazioni a pagaia. Le correnti costiere nel Pacifico nordorientale sono più favorevoli: la Corrente di Alaska segue la costa verso est-sudest, e la Corrente della California scende verso sud lungo la costa — esattamente nella direzione della colonizzazione. Nella zona critica dell'Alexander Archipelago e della British Columbia settentrionale, la navigazione nelle acque riparate tra le isole dell'arcipelago avrebbe ridotto quasi a zero l'esposizione ai venti d'alto mare.

9.2.3 La data 65.000 anni come calibrazione delle capacità nautiche umane

Madjedbebe non dimostra solo che gli esseri umani potevano navigare 65.000 anni fa; dimostra che lo facevano con sufficiente regolarità da costituire una popolazione fondatrice abbastanza grande da colonizzare un intero continente e da conservare la propria diversità genetica nel lungo periodo. La stima della dimensione effettiva della popolazione fondatrice australiana — nell'ordine di 1.000–10.000 individui secondo Tobler et al. (2017) — implica che la traversata da Sundaland a Sahul non fu un evento singolo e fortuito, ma una serie di eventi ripetuti su una scala temporale di secoli o millenni, con imbarcazioni capaci di trasportare più individui per traversata.

Questo è tecnologicamente rilevante: non si tratta di una singola zattera o canoa che riuscì miracolosamente a raggiungere l'Australia, ma di una tecnologia di costruzione e navigazione di imbarcazioni abbastanza affidabile e diffusa da produrre flussi di persone sufficienti a fondare e mantenere una popolazione. Il tipo di imbarcazione non è noto direttamente — la tafonomia del legno in clima tropicale umido garantisce la non-preservazione — ma i modelli etnoarcheologici delle imbarcazioni semplici utilizzate per attraversate simili da popolazioni tradizionali del Pacifico (la zattera di bambù, la piroga monossile, l'umiak di pelle) forniscono la gamma tecnologica plausibile.

9.3 Le tradizioni nautiche del Pacifico insulare: etnografia e archeologia dell'Olocene antico

9.3.1 Le imbarcazioni semplici del Pacifico: tipologia e capacità

Le imbarcazioni utilizzate per la navigazione insulare nel Pacifico dal Tardo Pleistocene all'Olocene antico — prima dello sviluppo delle canoe polinesiane a bilanciere con vela del secondo millennio a.C. — appartenevano a tre categorie tipologiche principali:

La **zattera di bambù o di legno** è la forma più semplice costruibile con tecnologie elementari: fasci di canne o tronchi legati con fibra vegetale, con o senza suprastruttura per il trasporto dei passeggeri. La zattera non ha chiglia e non può navigare efficacemente contro il vento; è adatta alla navigazione di corrente e nei canali protetti tra isole, e alle traversate brevi (meno di 100 km) in condizioni di mare calmo. La zattera è la tipologia che i modelli di colonizzazione di Sahul tendono a considerare il minimo tecnologico plausibile, e i test pratici condotti da Bednarik e collaboratori negli anni 1990–2000 (il progetto «First Mariners») con zattere costruite con tecnologie del Paleolitico hanno dimostrato che attraversate di 90 km in acque tropicali sono fattibili in tempi ragionevoli con zattere semplici di bambù e pagaie di legno.

La **piroga monossile** — una canoa scavata da un unico tronco — è il passo tecnico successivo, che richiede accesso a alberi di diametro adeguato (larghezza interna minima ca. 60 cm per trasportare più di un individuo con equipaggiamento) e strumenti per lo scavo (asce di pietra, fuoco controllato). La piroga ha migliore manovrabilità della zattera, può navigare con venti laterali, e nella sua versione con l'aggiunta di un contrappeso laterale (l'outrigger) raggiunge una stabilità che permette la navigazione in acque più agitate. Le piroga monossile più antiche note nel record archeologi — tra cui esempi dell'Olocene antico dall'Olanda (la *Pesse canoe*, ca. 8.000 anni cal BP) e dall'Indonesia (ca. 6.000 anni cal BP) — sono ben all'interno del range tecnologico raggiungibile con strumenti litici.

L'**umiak** — l'imbarcazione di pelle su telaio di osso o legno delle popolazioni artiche e subarctiche — è la tipologia più rilevante per la navigazione costiera del Pacifico nordorientale nel LGM. L'umiak tradizionale delle popolazioni Yupik e Inupiaq dell'Alaska è un'imbarcazione aperta di 5–12 m di lunghezza, costruita con un telaio di legno di deriva (driftwood) o di osso di balena rivestito di pelli di foca o di tricheco cucite e impermeabilizzate con grasso animale. Trasporta 6–20 persone più il loro equipaggiamento, naviga in acque ghiacciate e in mari con swells di 2–3 m, e ha un range operativo di centinaia di chilometri senza riparazioni. L'umiak non richiede materiali difficilmente reperibili nelle aree costiere subarctiche: il legno di deriva è abbondante sulle spiagge del Pacifico nordorientale grazie al trasporto dalle foreste siberiane lungo i fiumi settentrionali, le pelli di mammifero marino sono disponibili ovunque ci siano popolazioni di foca e leone marino, e le fibre per la cucitura si ottengono dai tendini dei mammiferi o dalle fibre vegetali della zona litorale. Non è possibile costruire un umiak con le tecniche del Paleolitico medio, ma è del tutto plausibile con le tecniche del Paleolitico superiore finale — la lavorazione dell'osso e dell'avorio, la concia elementare delle pelli, e la lavorazione del legno con strumenti litici sono tutte documentate nel record siberiano nordorientale.

9.3.2 Il caso della colonizzazione delle isole Ryukyu: navigazione non in linea di vista a 35.000 anni BP

Un benchmark tafonomico di grande importanza è la colonizzazione delle isole Ryukyu (l'arcipelago che si estende da Kyushu meridionale a Okinawa) durante il Paleolitico superiore giapponese. Le isole Ryukyu meridionali — in particolare Okinawa, Miyakojima, e le isole Yaeyama — erano separate dalla terraferma e dalle altre isole da canali oceanici non chiusi neanche durante il massimo LGM: il Canale di Kerama tra Okinawa e le isole a est aveva una profondità minima di oltre 200 m, non chiusibile da nessun abbassamento del livello del mare realistico nel Quaternario.

Siti paleolitici con resti umani (*Homo sapiens*) datati nell'intervallo 35.000–24.000 cal BP sono stati identificati a Okinawa (Uchiminami) e nelle Yaeyama (Shiraho-Saonetabaru) — date che richiedono attraversate di 50–80 km di oceano aperto, in acque con correnti della Corrente di Kuroshio, ca. 30.000 anni prima del periodo rilevante per le Americhe. Se le popolazioni del Paleolitico superiore giapponese erano capaci di attraversare 80 km di Kuroshio 35.000 anni fa, l'affermazione che le popolazioni del Paleolitico superiore finale siberiano fossero capaci di navigare i canali protetti dell'Alexander Archipelago 18.000 anni fa è sostenuta da un benchmark temporalmente e tecnologicamente molto più vicino di quello australiano.

9.3.3 Le isole Aleutine e la navigazione subartica: il kayak come tecnologia paleolitica

Le isole Aleutine si estendono per ca. 1.900 km dall'Alaska peninsulare verso ovest fino a poche centinaia di chilometri dalla Kamchatka, con traversate intermisola raramente superiori a 100 km (nella parte centrale, a ca. 800 km dall'Alaska, le isole sono molto più distanziate — fino a 400 km nelle Rat Islands). La colonizzazione delle Aleutine orientali e centrali — avvenuta nell'Olocene, non nel Pleistocene — richiedeva il kayak (la piccola imbarcazione monoposto a struttura di telaio e pelle delle popolazioni Unangan/Aleut) per la navigazione in acque con frequenti tempeste e swells di 4–6 m.

Il kayak è tecnologicamente più avanzato dell'umiak: richiede una costruzione del telaio più precisa (le stecche di legno o osso devono essere molto sottili per permettere la flessibilità senza perdita di rigidità) e una cucitura della pelle impermeabilizzata con un'accuratezza molto più alta (il kayak deve essere completamente impermeabile perché il passeggero vi è immerso fino alla vita). La sua comparsa nel record archeologi è difficile da documentare per le ragioni tafonomiche già discusse, ma la sua tecnologia di base — telaio di osso e pelle di mammifero marino — è chiaramente entro il range del Paleolitico superiore avanzato.

Per la rotta costiera del Pacifico nordorientale, il kayak non è il minimo tecnologico: l'umiak è sufficiente per le acque riparate dell'Alexander Archipelago e della British Columbia, e le zattere sarebbero probabilmente sufficienti per le attraversate più brevi nei mesi estivi. Il kayak diventa rilevante per le zone più esposte (la costa dell'Alaska sudoccidentale, le Aleutine) che però non sono necessariamente sul percorso principale della colonizzazione verso sud.

9.4 Le evidenze indirette di tecnologia nautica pre-Clovis

9.4.1 Il popolamento delle isole della British Columbia: Channel Islands e l'Alexander Archipelago

Le isole San Clemente, Santa Rosa, e Santa Cruz nel Canale della California — le Channel Islands — sono separata dalla terraferma californiana da ca. 80 km nelle condizioni attuali, con separazioni ridotte ma non eliminate durante il LGM (quando le quattro isole nordorientali si fondevano in un'unica isola più grande, Santarosae, separata dalla terraferma da ca. 60 km). Il sito di Arlington Springs su Santa Rosa ha prodotto resti umani (*Homo sapiens*, i siti di *Chumash Prehistory*) datati ca. 13.000 cal BP — coevi con Clovis, ma su un'isola che richiedeva la navigazione per essere raggiunta. La presenza umana alle Channel Islands a 13.000 cal BP non dimostra capacità nautiche pre-Clovis, ma dimostra che le popolazioni del Paleoindiano iniziale nordamericano avevano imbarcazioni capaci di attraversare 60 km di oceano aperto — capacità che quasi certamente non erano state sviluppate ex novo in pochi secoli ma che derivavano da una tradizione più antica.

Il sito di On Your Knees Cave sull'isola del Principe di Galles in Alaska — con resti umani datati ca. 10.300 cal BP appartenenti geneticamente alla discendenza dei First Americans (sezione 4.8.3 dell'integrazione al Capitolo IV) — è anch'esso un'evidenza indiretta di navigazione: l'isola era separata dalla terraferma anche durante il LGM da canali di acque profonde non chiudibili dall'abbassamento del livello del mare. Le popolazioni dell'Olocene antico che frequentavano l'isola del Principe di Galles ca. 10.300 cal BP erano quindi già radicate in una tradizione di navigazione costiera — che, data la dipendenza da risorse marine che il sito documenta, era probabilmente molto più antica della sua più antica testimonianza nel record.

9.4.2 L'evidenza della distribuzione dei manufatti esotici

Un'evidenza indiretta di mobilità nautica viene dalla distribuzione delle materie prime litiche esotiche nei siti costieri del Pacifico nordorientale. La presenza di selce o ossidiana da fonti distanti 200–500 km in siti costieri è spiegabile più facilmente dalla navigazione costiera che dai percorsi terrestri su terreni montagnosi. Nei siti dell'Alexander Archipelago datati all'Olocene antico (tra cui On Your Knees Cave e il

sito di Ground Hog Bay 2 in Alaska sudorientale, datato ca. 9.500 cal BP), la presenza di materie prime esotiche indica reti di scambio o di mobilità che si estendevano per centinaia di chilometri lungo la costa — coerente con una tradizione di navigazione costiera consolidata.

9.4.3 Il caso delle Americhe meridionali: l'arcipelago fuegino come laboratorio di tecnologia nautica elementare

L'arcipelago fuegino — il labirinto di isole, canali, e fiordi della Terra del Fuoco — era frequentato da popolazioni di cacciatori-raccoglitori marini (Yagán, Kawésqar, Selknam) fino al XIX e XX secolo, con tecnologie nautiche molto semplici: le canoe Yagán erano costruite con tre cortecce di faggio (*Nothofagus*) cucite con tendini di foca e impermeabilizzate con grasso, con una lunghezza di ca. 4–6 m e una capacità di 3–5 persone. Queste canoe estremamente semplici — costruite in poche ore da un adulto con strumenti che non superano la complessità di un'ascia di pietra levigata e di un coltello — erano sufficienti per la navigazione nei canali fuegini con condizioni marine che includono venti di forza 7–8 e swells di 3–4 m.

La comparsa dei Yagán nell'arcipelago fuegino è datata ca. 9.000–8.000 cal BP dai siti costieri più antichi, il che è coerente con una progressione della colonizzazione dal Sudamerica continentale verso l'arcipelago insulare dopo la glaciazione. Ma la loro tecnologia nautica — così elementare da essere costruita con risorse localmente disponibili in qualsiasi paesaggio costiero subantartico — è un modello per la stima delle capacità nautiche minime delle prime popolazioni costiere. Se la canoa fuegina è sufficiente per abitare l'arcipelago fuegino, una tecnologia di livello analogo era sufficiente per la navigazione costiera del Pacifico nordorientale nelle acque riparate dell'Alexander Archipelago.

9.5 Modellazione idrodinamica della rotta costiera del Pacifico

9.5.1 Le condizioni marine del Pacifico nordorientale durante il LGM

La ricostruzione delle condizioni marine del Pacifico nordorientale durante il LGM è essenziale per valutare la difficoltà tecnica della navigazione costiera in quel periodo. I dati disponibili provengono da tre fonti principali: i modelli paleoclimatici dell'atmosfera e dell'oceano (Shin et al. 2020; Kageyama et al. 2021 per il progetto PMIP4), i carotaggi del fondo oceanico con proxy di temperatura superficiale (foraminiferi, Mg/Ca delle valve), e i rilevamenti bathimetrici ad alta risoluzione che permettono di ricostruire la paleogeografia costiera.

Le caratteristiche principali del Pacifico nordorientale durante il LGM rilevanti per la navigazione costiera:

Temperature dell'acqua: Le temperature superficiali oceaniche (SST) nella zona tra 45°N e 60°N erano di 2–5°C più fredde delle attuali, nell'intervallo 6–12°C durante i mesi estivi. Questo è freddo per gli standard mediterranei o tropicali ma non eccezionalmente freddo per le popolazioni con adattamenti a climi subartici — le popolazioni siberiane nordorientali dell'Olocene recente navigavano in acque analoghe.

Copertura del ghiaccio marino: La copertura di ghiaccio marino nel Pacifico nordorientale durante il LGM era significativa nella parte settentrionale (Mar di Bering) ma non raggiungeva le latitudini rilevanti per la rotta costiera (la costa della British Columbia, ca. 50–55°N) nell'estate — analogamente all'attuale distribuzione del ghiaccio marino nel Pacifico nordorientale, dove il ghiaccio non raggiunge normalmente latitudini inferiori a 60°N nell'estate.

Regime dei venti: I venti prevalenti durante il LGM nella zona 45–60°N erano da ovest e nordovest — analoghi agli attuali venti degli Westerlies — che avrebbero facilitato la navigazione verso est ma ostacolato quella verso sud. Nelle acque riparate degli arcipelaghi costieri (Alexander Archipelago, Haida Gwaii), l'effetto dei venti d'alto mare era molto ridotto grazie alla schermatura delle isole.

Swells e altezza delle onde: La ricostruzione degli stati del mare durante il LGM è la più difficile delle variabili marine, in assenza di misurazioni dirette. I modelli di onde dipendono dal fetch (la distanza di oceano aperto su cui il vento agisce) e dalla velocità del vento. Nell'Alexander Archipelago, il fetch è ridotto dalla geometria dell'arcipelago e i mari interni mostrano altezze delle onde molto inferiori all'oceano aperto — condizioni navigabili per imbarcazioni semplici nell'estate.

9.5.2 I modelli di navigazione costiera: velocità, distanza giornaliera e autonomia

I modelli di navigazione costiera con imbarcazioni semplici — calibrati sui dati etnografici delle popolazioni costiere del Pacifico nordorientale e sulle sperimentazioni pratiche documentate (Bednarik 2003; Rausing 1984) — producono stime di velocità e distanza giornaliera navigabile in condizioni favorevoli:

Una zattera di legno di deriva con 5 pagaiatori: velocità di 2–3 nodi (3,7–5,6 km/h), distanza giornaliera in navigazione costiera di 30–50 km nelle condizioni protette degli arcipelaghi.

Un umiak di pelle con 8 pagaiatori: velocità di 3–5 nodi (5,6–9,3 km/h), distanza giornaliera di 50–80 km con possibilità di navigazione in acque moderatamente agitate (swell < 2 m).

Una piroga con outrigger con 3–4 pagaiatori: velocità di 4–6 nodi (7,4–11,1 km/h), distanza giornaliera di 60–100 km in condizioni favorevoli.

Con queste stime, la distanza dalla Kamchatka meridionale alla British Columbia settentrionale — ca. 4.000 km seguendo la rotta costiera attraverso le Aleutine — richiedeva ca. 100–130 giorni di navigazione attiva con una piroga o un umiak, distribuiti su 2–4 stagioni di navigazione estiva. Questo è un viaggio lungo ma non irragionevolmente lungo per gruppi abituati a una vita di mobilità stagionale; ed è un viaggio che non richiedeva mai una traversata di oceano aperto superiore a 100 km nelle Aleutine orientali e centrali, e superiore a 50 km nell'Alexander Archipelago.

9.5.3 La stagionalità della navigazione e le fermate di stazionamento

Un aspetto spesso trascurato nei modelli della rotta costiera è la stagionalità: la navigazione costiera in ambienti subartici è praticabile solo durante i mesi estivi (giugno–settembre), il che implica che una migrazione dalla Kamchatka alla British Columbia doveva distribuirsi su almeno 2–3 stagioni di navigazione con periodi di stazionamento invernale intermedi. Le aree di stazionamento invernale — dove la caccia terrestre e la pesca dei fiumi fornivano risorse durante i mesi di non-navigazione — erano le valli fluviali che scendono dalle montagne costiere, che ora sono in parte sommerse ma che durante il LGM erano esposte e dotate di risorse abbondanti.

Questo modello di migrazione a tappe — progresso estivo, stazionamento invernale — è esattamente il pattern documentato etnograficamente nelle migrazioni delle popolazioni costiere del Pacifico nordorientale pre-coloniale, ed è il pattern che produce i siti di frequentazione sparsi lungo la rotta costiera che ci si aspetterebbe di trovare nel record pre-Clovis. L'assenza di questi siti nel record attuale riflette la sommersione della piattaforma costiera (come discusso nella sezione §3.6 dell'integrazione al Capitolo III) più che l'assenza reale di stazionamenti lungo la rotta.

9.6 La rotta transpacifica: ipotesi alternativa o complementare?

9.6.1 La rotta transpacifica come ipotesi marginale ma non nulla

La rotta transpacifica diretta — dalla Melanesia o dal Giappone meridionale al Nordamerica o al Sudamerica attraverso l'oceano Pacifico aperto — è una delle ipotesi più marginali nel dibattito sul poblamento americano, ma non è epistemicamente nulla. Le evidenze genetiche della componente Population Y (discussa nella sezione 4.5 dell'integrazione al Capitolo IV) — l'affinity genetica di alcune popolazioni amazzoniche con le popolazioni australiane e melanesiane — ha riacceso il dibattito su un possibile contatto preistorico tra il Pacifico meridionale e il Sudamerica.

La valutazione di questa ipotesi richiede la distinzione tra due varianti molto diverse: un contatto preistorico antico (Pleistocene finale o Olocene antico, plausibilmente connesso al primo poblamento) e un contatto preistorico recente (Olocene tardo, plausibilmente connesso alla navigazione polinesiana). La seconda

variante è ora solidamente documentata: il segnale genetico polinesiano nella popolazione Rapa Nui (Isola di Pasqua) e i correlati archeologi della presenza polinesiana in Cile settentrionale (la gallina *Gallus gallus* in siti precolombiani, con sequenza mitocondriale di tipo polinesiaco; Storey et al. 2007) dimostrano contatti tardivi che non sono rilevanti per il primo poblamento. La prima variante — il contatto paleoindiano con il Pacifico — è molto più incerta, e le sue implicazioni per il timing del primo poblamento sono trattate con appropriata cautela nella sezione §6.3.2 del capitolo originale.

9.6.2 Il confronto tra la rotta transpacifica e la rotta costiera: plausibilità tecnica

La plausibilità tecnica della rotta transpacifica per il LGM è molto inferiore a quella della rotta costiera, per ragioni idrodinamiche fondamentali. Il Pacifico equatoriale nord — la zona che deve essere attraversata in una rotta dalla Melanesia al Sudamerica — è dominato dalla Corrente Equatoriale Nordamericana che scorre verso ovest: esattamente nella direzione sbagliata per una traversata est-ovest. La rotta più favorevole sarebbe attraverso la corrente del Kuroshio (che scorre verso nord-nordest) fino alle latitudini dell'arco aleutino, e poi verso est-sudest con il flusso della Corrente del Nord Pacifico — ma questo è essenzialmente la rotta costiera del Pacifico nordorientale con l'aggiunta di un tratto ad alto mare prima dell'atterraggio in North America.

La navigazione oceanica nel Pacifico aperto richiede tecnologie nautiche significativamente più avanzate di quelle richieste dalla navigazione costiera: vela (la pagaia non è sufficiente per traversate di migliaia di chilometri), navigazione astronomica sistematica, e imbarcazioni con stabilità sufficiente per resistere alle tempeste di alto mare. Queste tecnologie sono documentate nelle culture del Pacifico insulare del II millennio a.C. — la migrazione polinesiana — ma non nel record del Paleolitico superiore finale.

9.7 Conclusioni: la plausibilità della rotta costiera come dato stabilito

La sintesi delle evidenze presentate in questo capitolo permette di concludere con alta confidenza che la tecnologia nautica necessaria per la rotta costiera del Pacifico nordorientale era disponibile alle popolazioni del Paleolitico superiore siberiano orientale nel periodo rilevante per il primo poblamento americano. Questa conclusione si basa su:

24. Il benchmark australiano (65.000 anni BP) dimostra che esseri umani anatomicamente moderni erano capaci di navigazione transoceanica molto

prima del LGM, con tecnologie compatibili con quelle del Paleolitico inferiore-medio.

25. Il benchmark delle Ryukyu (35.000 anni BP) dimostra che le popolazioni del Paleolitico superiore giapponese-siberiano erano capaci di navigazione non in linea di vista attraverso il Kuroshio, 17.000 anni prima del periodo rilevante per le Americhe.
26. La modellazione idrodinamica mostra che la navigazione costiera del Pacifico nordorientale durante il LGM era tecnicamente meno impegnativa di entrambi i benchmark, richiedendo solo navigazione in acque protette con attraversate massime di 50–100 km in linea di vista.
27. La tecnologia dell'umiak e della piroga è all'interno del range del Paleolitico superiore avanzato, con materiali disponibili lungo tutta la rotta costiera.
28. Le evidenze indirette — distribuzione delle materie prime esotiche, presenza umana su isole della British Columbia nell'Olocene antico, resti umani del Paleoindiano sulle Channel Islands — documentano una tradizione di navigazione costiera già consolidata all'inizio del record disponibile.

La questione della tecnologia nautica non è quindi l'anello debole del modello della rotta costiera; l'anello debole — come discusso estensivamente nel Capitolo VI — è la povertà del record diretto di siti pleistocenici sulla costa stessa, spiegabile con la sommersione della piattaforma costiera ma non ancora direttamente dimostrata. Il programma di ricerca prioritario identificato nel Capitolo VI — la survey sistematica della piattaforma sommersa del Pacifico nordorientale attraverso ROV — è la strada maestra per trasformare un argomento dalla plausibilità tecnica alla documentazione diretta.

Riferimenti principali

Bednarik, R.G. (2003). Seafaring in the Pleistocene. *Cambridge Archaeological Journal*, 13, 41–66.

Clarkson, C. et al. (2017). Human occupation of northern Australia by 65,000 years ago. *Nature*, 547, 306–310.

Erlandson, J.M. et al. (2007). The Kelp Highway Hypothesis: Marine Ecology, the Coastal Migration Theory, and the Peopling of the Americas. *Journal of Island and Coastal Archaeology*, 2, 161–174.

Fedje, D.W. & Josenhans, H. (2000). Drowned forests and archaeology on the continental shelf of British Columbia, Canada. *Geology*, 28, 99–102.

Fladmark, K.R. (1979). Routes: Alternate Migration Corridors for Early Man in North America. *American Antiquity*, 44, 55–69.

Kageyama, M. et al. (2021). The PMIP4 Last Glacial Maximum experiments: preliminary results and comparison with the PMIP3 simulations. *Climate of the Past*, 17, 1065–1089.

Malaspinas, A.-S. et al. (2016). A genomic history of Aboriginal Australia. *Nature*, 538, 207–214.

Moreno-Mayar, J.V. et al. (2018). Terminal Pleistocene Alaskan genome reveals first founding population of Native Americans. *Nature*, 553, 203–207.

Rausing, G. (1984). *The Bow: Some Notes on Its Origin and Development*. Acta Archaeologica Lundensia.

Shin, S.I. et al. (2020). Understanding the Mid-Holocene climate. *Geophysical Research Letters*, 47, e2020GL088027.

Skoglund, P. et al. (2015). Genetic evidence for two founding populations of the Americas. *Nature*, 525, 104–108.

Storey, A.A. et al. (2007). Radiocarbon and DNA evidence for a pre-Columbian introduction of Polynesian chickens to Chile. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104, 10335–10339.

Tobler, R. et al. (2017). Aboriginal mitogenomes reveal 50,000 years of regionalism in Australia. *Nature*, 544, 180–184.

Silvano Salvador · Il Problema pre-Clovis

Riferimenti principali integrati

Adovasio, J.M. & Pedler, D. (2004). Pre-Clovis Sites and Their Implications for Human Occupation Before the Last Glacial Maximum. In: Madsen, D.B. (ed.) *Entering America: Northeast Asia and Beringia Before the Last Glacial Maximum*. University of Utah Press, 139–158.

Adovasio, J.M. & Page, J. (2002). *The First Americans: In Pursuit of Archaeology's Greatest Mystery*. Random House, New York.

Ardelean, C.F. et al. (2020). Evidence of human occupation in Mexico around the Last Glacial Maximum. *Nature*, 584, 87–92.

Becerra-Valdivia, L. & Higham, T. (2020). The timing and effect of the earliest human arrivals in North America. *Nature*, 584, 93–97.

Boucher de Perthes, J. (1847). *Antiquités celtiques et antédiluviennes*. Paris.

Bourgeon, L., Burke, A. & Higham, T. (2017). Earliest Human Presence in North America Dated to the Last Glacial Maximum. *PLOS ONE*, 12(1), e0169486.

Chatters, J.C. et al. (2014). Late Pleistocene Human Skeleton and mtDNA Link Paleoamericans and Modern Native Americans. *Science*, 344, 750–754.

Dee, M. & Ramsey, C.B. (2014). High-precision Bayesian modeling of samples susceptible to inbuilt age. *Radiocarbon*, 56, 83–94.

Deméré, T.A. et al. (2017). A 130,000-Year-Old Archaeological Site in Southern California, USA. *Nature*, 544, 479–483.

Dillehay, T.D. (1989). *Monte Verde: A Late Pleistocene Settlement in Chile. Volume I: Palaeoenvironment and Site Context*. Smithsonian Institution Press.

Dillehay, T.D. (1997). *Monte Verde: A Late Pleistocene Settlement in Chile. Volume II: The Archaeological Context and Interpretation*. Smithsonian Institution Press.

Elias, S.A., Short, S.K. & Birks, H.H. (1997). Late Wisconsin environments of the Bering Land Bridge. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 136, 293–308.

Fagundes, N.J.R. et al. (2008). Mitochondrial Population Genomics Supports a Single Pre-Clovis Origin with a Coastal Route for the Peopling of the Americas. *American Journal of Human Genetics*, 82, 583–592.

Fedje, D.W. & Josenhans, H. (2000). Drowned forests and archaeology on the continental shelf of British Columbia, Canada. *Geology*, 28, 99–102.

Fiedel, S.J. (1999). Artifact Provenience at Monte Verde: Confusion and Contradictions. *Scientific American Discovering Archaeology*, Special Report, 1–12.

Gilbert, M.T.P. et al. (2008). DNA from Pre-Clovis Human Coprolites in Oregon, North America. *Science*, 320, 786–789.

Guidon, N. & Delibrias, G. (1986). Carbon-14 dates point to man in the Americas 32,000 years ago. *Nature*, 321, 769–771.

Haynes, C.V. (1964). Fluted Projectile Points: Their Age and Dispersion. *Science*, 145, 1408–1413.

Hess, H.H. (1962). History of ocean basins. In: Engel, A.E.J. et al. (eds.) *Petrologic Studies: A Volume to Honor A.F. Buddington*. Geological Society of America, 599–620.

Jenkins, D.L. et al. (2012). Clovis Age Western Stemmed Projectile Points and Human Coprolites at the Paisley Caves. *Science*, 337, 223–228.

Kienast, F. et al. (2005). Palaeobotanical evidence for warm summers in the East Siberian Arctic during the last cold stage. *Quaternary Research*, 63, 283–300.

Koch, P.L. & Barnosky, A.D. (2006). Late Quaternary Extinctions: State of the Debate. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 37, 215–250.

Kuhn, T.S. (1962). *The Structure of Scientific Revolutions*. University of Chicago Press.

Lakatos, I. (1978). *The Methodology of Scientific Research Programmes*. Cambridge University Press.

Margold, M. et al. (2018). Reconciling Quaternary ice-sheet chronology using infrared stimulated luminescence data. *Quaternary Science Reviews*, 186, 168–185.

Martin, P.S. (1967). Prehistoric overkill. In: Martin, P.S. & Wright, H.E. (eds.) *Pleistocene Extinctions: The Search for a Cause*. Yale University Press, 75–120.

Meltzer, D.J. (2009). *First Peoples in a New World: Colonizing Ice Age America*. University of California Press.

Mercier, N. et al. (2013). OSL dating of the Pedra Furada rockshelter (Piauí, Brazil). *Journal of Archaeological Science*, 40, 2158–2175.

Meltzer, D.J. et al. (1994). On the Pleistocene Antiquity of Monte Verde, Southern Chile. *American Antiquity*, 59, 101–112.

Moreno-Mayar, J.V. et al. (2018). Terminal Pleistocene Alaskan genome reveals first founding population of Native Americans. *Nature*, 553, 203–207.

Murray, A.S. & Wintle, A.G. (2000). Luminescence dating of quartz using an improved single-aliquot regenerative-dose protocol. *Radiation Measurements*, 32, 57–73.

Pedersen, M.W. et al. (2016). Postglacial viability and colonization in North America's ice-free corridor. *Nature*, 537, 45–49.

Perego, U.A. et al. (2009). Distinctive Paleo-Indian Migration Routes from Beringia Evidenced by Two Rare mtDNA Haplogroups. *Current Biology*, 19, 1–8.

Pitulko, V.V. et al. (2004). The Yana RHS Site: Humans in the Arctic Before the Last Glacial Maximum. *Science*, 303, 52–56.

Posth, C. et al. (2018). Reconstructing the Deep Population History of Central and South America. *Cell*, 175, 1185–1197.

Raghavan, M. et al. (2015). Genomic evidence for the Pleistocene and recent population history of Native Americans. *Science*, 349, aab3884.

Rasmussen, M. et al. (2014). The genome of a Late Pleistocene human from a Clovis burial site in western Montana. *Nature*, 506, 225–229.

Reimer, P.J. et al. (2020). The IntCal20 Northern Hemisphere Radiocarbon Age Calibration Curve. *Radiocarbon*, 62, 725–757.

Reidla, M. et al. (2003). Origin and Diffusion of mtDNA Haplogroup X. *American Journal of Human Genetics*, 73, 1178–1190.

Roberts, G.O. & Rosenthal, J.S. (2001). Optimal scaling for various Metropolis-Hastings algorithms. *Statistical Science*, 16, 351–367.

Skoglund, P. et al. (2015). Genetic evidence for two founding populations of the Americas. *Nature*, 525, 104–108.

Soares, P. et al. (2009). Correcting for Purifying Selection: An Improved Human Mitochondrial Molecular Clock. *American Journal of Human Genetics*, 84, 740–759.

Stanford, D. & Bradley, B. (2012). *Across Atlantic Ice: The Origin of America's Clovis Culture*. University of California Press.

Tamm, E. et al. (2007). Beringian Standstill and Spread of Native American Founders. *PLOS ONE*, 2(9), e829.

Waters, M.R. & Stafford, T.W. (2007). Redefining the Age of Clovis: Implications for the Peopling of the Americas. *Science*, 315, 1122–1126.

Wegener, A. (1912). Die Entstehung der Kontinente. *Geologische Rundschau*, 3, 276–292.